

Universidad Carlos III de Madrid

Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de
Estructuras



DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL DAÑO TRANSVERSAL EN LA
MATRIZ DE UN MATERIAL COMPUESTO MEDIANTE LA
UTILIZACIÓN DE UN SISTEMA DE EMISIONES ACÚSTICAS

Proyecto Fin de Carrera

Ingeniería Industrial

AUTORA: Ana María Abad Blázquez

TUTORES: Dr. Ever J. Barbero (West Virginia University, Morgantown, USA)

Dr. Carlos Navarro Ugena (Universidad Carlos III de Madrid)

Febrero 2012

Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer al profesor Carlos Navarro la confianza depositada y la oportunidad de poder realizar este proyecto en Estados Unidos. También me gustaría agradecer su insistencia en la importancia de vivir una experiencia en el extranjero.

Mi más profundo agradecimiento al profesor Ever J. Barbero de la West Virginia University por toda su ayuda, consejo y cariño tan especial que hizo que mi primera estancia en el extranjero fuera una experiencia inolvidable. Agradezco no solo su apoyo profesional sino también su trato personal fuera de la universidad.

Mi agradecimiento más especial va dirigido hacia Miguel, por todo su cariño, comprensión y ayuda incondicional durante todos estos años de carrera. Nada hubiera sido posible sin ti.

No obstante, mi mayor agradecimiento es para mis padres, Ana y Pedro, quienes me han apoyado desde el primer momento de la carrera y siempre han estado animándome, tanto en los buenos como en los malos momentos, que no han sido pocos.

Me gustaría dar las gracias a mi hermana Laura, a mi abuela Luisa y al resto de mi familia por toda la comprensión y el apoyo que me han dado en todo momento.

También quería mencionar a mis compañeros de universidad, Jesús, Vanesa... (no es posible mencionarlos a todos) por su amistad desde los primeros días de clase. Tantos recuerdos...

Así mismo, muchas gracias al profesor Hermann Alcázar y a Ruth (West Virginia University) por su ayuda en el inicio del proyecto.

Abstract

The research of matrix cracking in a composite material laminate is of paramount importance nowadays. Although it is not a catastrophic damage mode, intralaminar cracking causes the appearance of other more critical damage modes that may lead to the failure of the material.

In this project, detection of transversal matrix cracking has been developed in a composite material laminate throughout an Acoustic Emissions system (AE). Intralaminar cracks appear as longitudinal strain increases. In order to calibrate and validate this detection system, radiographies from tested specimens have been performed. The number of cracks is counted on the radiographies of each specimen and this number is contrasted with the results recorded by the AE system.

The fabrication of the composite material laminates has been performed. The composite material employed is a unidirectional carbon/epoxy prepreg. The curing cycle was executed into an oven by means of vacuum bag processing. Subsequently, the plates obtained were prepared for tensile testing with a Universal Testing Machine.

The results support the existence of a correlation between the acoustic emissions detected by the AE system and the formation of intralaminar cracks shown through the radiographies.

Resumen

El estudio de la aparición de fisuras en la matriz de un material compuesto es de gran relevancia hoy en día. Este tipo de daño, aunque no catastrófico, provoca la aparición de otros tipos de daño más severos que pueden llevar a la rotura del material.

En este proyecto, se ha llevado a cabo la detección de la formación de fisuras transversales en un material compuesto laminado haciendo uso de un sistema de Emisiones Acústicas (AE). Este sistema no había sido utilizado anteriormente. La calibración y validación de dicho sistema han sido realizadas mediante el uso de radiografías. A través de éstas se han contabilizado las fisuras aparecidas en cada una de las muestras ensayadas, las cuales han sido comparadas con los resultados obtenidos por el sistema AE.

Para la realización de estos ensayos, ha sido necesario fabricar laminados de material compuesto. El material empleado ha sido un prepreg unidireccional de fibra de carbono en matriz epoxi. Se ha realizado su curado en un horno mediante la técnica de bolsa de vacío. Posteriormente, las planchas obtenidas han sido preparadas para la realización de las pruebas en una máquina universal de ensayos.

Las fisuras intralaminares se generan a medida que aumenta la deformación longitudinal. Los resultados obtenidos demuestran que existe una correlación entre las emisiones acústicas detectadas por el sistema AE y la formación de fisuras intralaminares observadas en las radiografías.

Índice

1. Introducción

1.1.	Motivación_____	1
1.2.	Objetivos_____	3
1.3.	Estructura de este proyecto_____	4

2. Revisión de literatura

2.1.	Aparición de fisuras transversales_____	6
2.2.	Procesos de fabricación de materiales compuestos_____	11
2.2.1.	<i>Fabricación por moldeo a mano y mediante el uso de prepregs</i> _____	11
2.2.2.	<i>Materiales preimpregnados</i> _____	13
2.2.2.1.	<i>Precompresión (Debulking)</i> _____	16
2.2.3.	<i>Bolsa de vacío y Autoclave</i> _____	16
2.2.4.	<i>Curado de materiales sin utilizar autoclave</i> _____	20
2.3.	Técnica de Emisiones Acústicas_____	21
2.4.	Técnica de raxos-X_____	23

3. Desarrollo experimental

3.1.	Resumen del procedimiento experimental_____	24
3.2.	Fabricación del material_____	26
3.2.1.	<i>Descripción del material</i> _____	26
3.2.2.	<i>Ciclo de curado</i> _____	32
3.2.3.	<i>Procesado en bolsa de vacío</i> _____	35
3.2.3.1.	<i>Procedimiento para la fabricación de la bolsa</i> _____	39
3.3.	Preparación de las muestras_____	43
3.3.1.	<i>Introducción</i> _____	43
3.3.2.	<i>Corte</i> _____	44
3.3.3.	<i>Colocación de las galgas extensométricas</i> _____	46
3.3.3.1.	<i>Pasos a seguir para la colocación de una galga</i> _____	47
3.3.4.	<i>Colocación de los micrófonos</i> _____	52
3.3.5.	<i>Colocación de los tabs</i> _____	53
3.4.	Máquina Universal de Ensayos_____	54
3.4.1.	<i>Elementos y descripción</i> _____	54

3.5.	Máquina de Rayos-X	55
3.5.1.	Descripción	55
3.5.2.	Procedimiento	58
3.5.2.1.	Preparación del líquido penetrante	58
3.5.2.2.	Aplicación del líquido sobre la muestra	58
3.5.2.3.	Exposición y revelado de la radiografía	59
3.6.	Sistema de Emisiones Acústicas	61
3.6.1.	Descripción del sistema y sus aplicaciones	61
3.6.2.	Parámetros básicos	63
3.6.3.	Teoría de localización	65
3.6.4.	Configuración del sistema de adquisición de datos de AE	67
3.6.4.1.	Cálculo de la velocidad	67
3.6.4.2.	Entradas analógicas: fuerza y deformación	69
3.7.	Esquema del sistema completo	70
4.	Resultados experimentales	72
4.1.	Laminados en los que domina el modo I de fractura	74
4.1.1.	Validación y filtrado de las emisiones acústicas: laminado A	74
4.1.2.	Validación y filtrado de las emisiones acústicas: laminado B	85
4.1.3.	Resultados para los laminados A y B	96
4.1.3.1.	Laminado A	96
4.1.3.2.	Laminado B	99
4.2.	Laminados en los que aparece el modo II de fractura	102
4.2.1.	Validación y filtrado de las emisiones acústicas: laminado C	102
4.2.2.	Validación y filtrado de las emisiones acústicas: laminado D	113
4.2.3.	Resultados para los laminados C y D	123
4.2.3.1.	Laminado C	123
4.2.3.2.	Laminado D	127
5.	Conclusiones y trabajos futuros	130
5.1.	Resumen y conclusiones	130
5.2.	Trabajos futuros	132
	Anexo: Radiografías	133
	Referencias	142

Índice de figuras

Capítulo 2

2.1.	Representación esquemática de la distancia entre dos fisuras consecutivas	7
2.2.	Gráficas que muestran la densidad de fisuras frente a la deformación para tres laminados con diferentes orientaciones (modelo analítico y resultados experimentales). El material empleado es fibra de vidrio-E/epoxi	8
2.3.	Gráficas que muestran la densidad de fisuras frente a la deformación para tres laminados con diferentes orientaciones (resultados experimentales)	9
2.4.	Fabricación de materiales compuestos mediante moldeo a mano (izquierda) y mediante el uso de prepregs (derecha)	13
2.5.	Material prepeg unidireccional	14
2.6.	Material prepeg tejido	14
2.7.	Esquema de una bolsa de vacío y sus componentes	17
2.8.	Representación de una bolsa de vacío y sus componentes	18
2.9.	Fotografía de una bolsa de vacío	18
2.10.	Fotografía de un autoclave	19
2.11.	Liberación de energía en función del tipo de mecanismo de daño	21
2.12.	Radiografía de una probeta de fibra de carbono/epoxi sometida a una deformación de 1,33%	23

Capítulo 3

3.1.	Material MTM45-1 durante el proceso de apilado de las láminas	27
3.2.	Rollo de material prepeg MTM45-1	27
3.3.	Representación esquemática del laminado A	28
3.4.	Representación esquemática del laminado B	29
3.5.	Representación esquemática del laminado C	30
3.6.	Imagen con la disposición de las láminas del laminado C	30
3.7.	Representación esquemática del laminado D	31
3.8.	Ciclo de curado del material: Temperatura frente a Tiempo	34

3.9.	Fotografía de la bolsa de vacío terminada y de algunos de los componentes necesarios para llevarla a cabo	35
3.10.	Fotografía de la plancha de aluminio	35
3.11.	Fotografía del sello adhesivo	36
3.12.	Fotografía del film impermeable	36
3.13.	Fotografía de la piel del laminado	37
3.14.	Fotografía del cordón de fibra de vidrio	37
3.15.	Fotografía del respirador	38
3.16.	Material plástico que forma la última capa de la bolsa (izquierda) y conjunto de la bolsa de vacío terminada (derecha)	38
3.17.	Representación de los elementos que componen la bolsa de vacío	41
3.18.	Representación en planta de la bolsa de vacío	42
3.19.	Probeta después de la colocación de los tabs	43
3.20.	Esquema de colocación de los tabs y los micrófonos sobre una probeta	43
3.21.	Máquina de corte: sistema de fijación (izquierda) y disco de corte (derecha)	45
3.22.	Modelo de galga extensométrica utilizado (izquierda) y disposición en una de las probetas a ensayar (derecha)	46
3.23.	Representación del paso 1	47
3.24.	Representación del paso 2	48
3.25.	Representación del paso 3	48
3.26.	Representación del paso 4	49
3.27.	Representación del paso 5	49
3.28.	Representación del paso 6	50
3.29.	Representación del paso 7	50
3.30.	Representación del paso 8	50
3.31.	Representación del paso 9	51
3.32.	Detalle de uno de los sensores de emisiones acústicas y ejemplo de una probeta preparada para ser ensayada	52
3.33.	Máquina Universal de Ensayos utilizada	54
3.34.	Máquina de rayos-X Faxitron 43855A	55
3.35.	Panel de control de la máquina de rayos-X Faxitron 43855A	56
3.36.	Film fotográfico utilizado	59
3.37.	Ejemplo de radiografía obtenida del laminado A	60
3.38.	Soporte para colocar el film fotográfico	60
3.39.	Sistema de Emisiones Acústicas (AE)	61
3.40.	Preamplificador y sensor acústico	62
3.41.	Probeta con los sensores acústicos	62
3.42.	Características básicas que definen una onda acústica	63
3.43.	Representación del sistema material-emisión acústica-sensores acústicos	66

3.44.	Ensayo para la determinación de la velocidad de las emisiones acústicas en la probeta_____	69
3.45.	Disposición del sistema completo en el laboratorio_____	71
3.46.	Esquema de conexiones del sistema completo_____	71

Capítulo 4

4.1.	Densidad de fisuras frente a deformación. Lecturas obtenidas en la radiografía de cada etapa de la probeta A-1_____	75
4.2.	Identificación de las fisuras formadas durante la primera etapa (A-1-a), con una deformación de 0,90%. Radiografía obtenida (izquierda) y tabla resumen de resultados obtenidos por AE (derecha)_____	76
4.3.	Número de eventos frente a energía. Ensayo A-1-a_____	78
4.4.	Radiografía obtenida tras el ensayo A-1-b, con deformación de 1,10%_____	79
4.5.	Número de eventos frente a energía. Ensayo A-1-b_____	80
4.6.	Radiografía obtenida tras el ensayo A-1-c con una deformación de 1,40%_____	81
4.7.	Número de eventos frente a energía. Ensayo A-1-c_____	82
4.8.	Número de eventos frente a energía. Ensayo A-1_____	83
4.9.	Distribución de energía de los eventos capturados por AE y representación de las cotas superior (45 mJ) e inferior (3 mJ)_____	84
4.10.	Densidad de fisuras frente a deformación. Lecturas obtenidas en la radiografía de cada etapa de la probeta B-1_____	85
4.11.	Identificación de las fisuras formadas durante la primera etapa (B-1-a) con una deformación de 0,60%. Radiografía obtenida (izquierda) y tabla resumen de resultados obtenidos por AE (derecha)_____	87
4.12.	Número de eventos frente a energía. Ensayo B-1-a_____	89
4.13.	Número de eventos frente a energía. Ensayo B-1-b (izquierda) y ensayo B-1-c (derecha)_____	90
4.14.	Radiografías realizadas tras la segunda etapa (a) y tras la tercera etapa (b) con una deformación de 0,70% y 0,80% respectivamente_____	90
4.15.	Número de eventos frente a energía durante las tres etapas del ensayo B-1_____	91
4.16.	Distribución de la energía en los eventos registrados para la muestra A-1 (a) y B-1 (b). También se representan la cota inferior (en azul) y la cota superior (en negro) para el criterio de energía_____	92
4.17.	Distribución de la amplitud frente a la energía en los eventos evaluados para la muestra A-1 (a) y B-1 (b). Se representan la cota inferior (en rojo) y la cota superior (en magenta)_____	93

4.18.	Representación de la energía y la amplitud máxima de dos ondas acústicas	94
4.19.	Densidad de fisuras frente a deformación. Probeta A-1	97
4.20.	Densidad de fisuras frente a deformación. Probeta A-2 (a) y probeta A-3 (b)	97
4.21.	Radiografías de las muestras A-2 (a) y A-3 (b) con un 1,40% de deformación	98
4.22.	Densidad de fisuras frente a deformación para las tres probetas del laminado A [0/90 ₄] _s	98
4.23.	Densidad de fisuras frente a deformación. Probeta B-1	99
4.24.	Densidad de fisuras frente a deformación. Probeta B-2 (a) y probeta B-3 (b)	100
4.25.	Radiografías de las muestras B-2 (a) y B-3 (b) con 0,80% de deformación	100
4.26.	Densidad de fisuras frente a deformación para las tres probetas del laminado B [$\pm 25/90_5$] _s	101
4.27.	Densidad de fisuras frente a deformación longitudinal. Lecturas obtenidas en la radiografía de cada etapa de la probeta C-1	103
4.28.	Identificación de las fisuras formadas durante la primera etapa (C-1-a) para una deformación de 0,87%. Radiografía obtenida (izquierda) y tabla resumen de resultados obtenidos por AE (derecha)	104
4.29.	Número de eventos frente a energía. Ensayo C-1-a	106
4.30.	Radiografía obtenida de la muestra C-1 con 1,15% de deformación	107
4.31.	Distribución de energía de los eventos registrados durante el ensayo C-1-b y detalle en el rango 0 – 5 mJ	107
4.32.	Radiografía obtenida de la muestra C-1 con una deformación de 1,25%	108
4.33.	Distribución de energía de los eventos capturados en la tercera etapa del ensayo C-1 y detalle en el rango 0-500 (0 – 5 mJ)	109
4.34.	Número de eventos frente a Energía x Amplitud durante las tres etapas del ensayo C-1	110
4.35.	Ilustración del criterio aplicado para el laminado C y detalle de la región de interés	111
4.36.	Densidad de fisuras frente a deformación longitudinal. Resultados obtenidos de la lectura de las radiografías tras cada etapa para la muestra D-1	113
4.37.	Identificación de las fisuras formadas durante la primera etapa (D-1-a) con un 0,57% de deformación. Radiografía obtenida (izquierda) y tabla resumen de resultados obtenidos por AE (derecha)	114
4.38.	Número de eventos frente al producto de energía por amplitud. Ensayo D-1-a	116
4.39.	Número de eventos frente al producto de energía por amplitud. Ensayo D-1-b	117
4.40.	Radiografía obtenida tras el ensayo D-1-b con una deformación de 0,60%	117
4.41.	Radiografías realizadas tras la tercera (a) y la cuarta etapa (b) con una deformación de 0,7% y 1,20% respectivamente	118
4.42.	Número de eventos frente al producto de energía por amplitud. Ensayo D-1-c (izquierda) y ensayo D-1-d (derecha)	119
4.43.	Ilustración del criterio aplicado para la probeta D-1	121

4.44.	Cota inferior y superior para cada uno de los laminados de estudio	122
4.45.	Densidad de fisuras frente a deformación. Probeta C-1	124
4.46.	Densidad de fisuras frente a deformación. Probetas C-2 (a) y C-3 (b)	125
4.47.	Radiografía de la muestra C-3 con una deformación de 1,40%	126
4.48.	Densidad de fisuras frente a deformación para las tres probetas del laminado C [0/±55 ₄ /0 _{1/2}] _s	126
4.49.	Densidad de fisuras frente a deformación. Probeta D-1	127
4.50.	Densidad de fisuras frente a deformación. Probetas D-2 (a) y D-3 (b)	128
4.51.	Radiografías de las muestras D-2 (a) con un 1,25% de deformación y D-3 (b) con un 1,20% de deformación	128
4.52.	Densidad de fisuras frente a deformación de las tres probetas ensayadas para el laminado D [0/±70 ₄ /0 _{1/2}] _s	129

Anexo

An.1.	Radiografías realizadas tras cada etapa durante el ensayo A-1	134
An.2.	Radiografías realizadas tras los ensayos A-2 (izquierda) y A-3 (derecha)	135
An.3.	Radiografías realizadas tras cada etapa durante el ensayo B-1	136
An.4.	Radiografías realizadas tras los ensayos B-2 (izquierda) y B-3 (derecha)	137
An.5.	Radiografías realizadas tras cada etapa durante el ensayo C-1	138
An.6.	Radiografías realizadas tras los ensayos C-2 (izquierda) y C-3 (derecha)	139
An.7.	Radiografías realizadas tras cada etapa durante el ensayo D-1	140
An.8.	Radiografías realizadas en ensayos D-2 (izquierda y centro) y D-3 (derecha)	141

Índice de tablas

Capítulo 2

2.1.	Ventajas y desventajas de la fabricación de materiales compuestos mediante moldeo a mano y mediante el uso de prepregs_____	<u>12</u>
2.2.	Parámetros característicos de un material prepreg_____	<u>15</u>
2.3.	Definición de los componentes que forman una bolsa de vacío_____	<u>17</u>

Capítulo 3

3.1.	Características de las láminas utilizadas_____	<u>27</u>
3.2.	Laminados ensayados_____	<u>28</u>
3.3.	Propiedades mecánicas del material empleado_____	<u>32</u>
3.4.	Características del proceso de curado del material MTM45-1 mediante el proceso de bolsa de vacío y de autoclave_____	<u>33</u>
3.5.	Resumen de las características básicas de una onda acústica: resolución, unidades y rango_____	<u>65</u>

Capítulo 4

4.1.	Resumen de los resultados del ensayo A-1 en cada etapa_____	<u>75</u>
4.2.	Resumen de los resultados obtenidos para los eventos registrados por AE en el ensayo A-1-a; se han resaltado los eventos asociados a la formación de fisuras en la muestra_____	<u>77</u>
4.3.	Comparación de resultados del criterio aplicado frente a las radiografías_____	<u>83</u>
4.4.	Resumen de los resultados del ensayo B-1 en cada etapa_____	<u>86</u>
4.5.	Resumen de los resultados obtenidos para los eventos registrados por AE en el ensayo B-1-a; se han resaltado los eventos asociados a la formación de fisuras en la muestra_____	<u>88</u>
4.6.	Comparación de resultados del criterio aplicado frente a las radiografías_____	<u>92</u>

4.7.	Comparación de resultados según el criterio empleado para las muestras A-1 y B-1. Número de fisuras detectadas por AE, número de fisuras observadas en las radiografías y grado de correspondencia	94
4.8.	Resumen de los ensayos realizados para las muestras de los laminados A y B, $n_i^{Xray}(\epsilon_{x,max})$	96
4.9.	Resumen de los resultados del ensayo C-1 en cada etapa	103
4.10.	Resumen de los resultados obtenidos para los eventos registrados por AE en el ensayo C-1-a; se han resaltado los eventos asociados a la formación de fisuras en la muestra	105
4.11.	Comparación de resultados del criterio aplicado frente a las radiografías	110
4.12.	Comparación de resultados según el criterio empleado para la muestra C-1. Número de fisuras observadas en las radiografías, número de fisuras detectadas por AE y grado de correspondencia	112
4.13.	Resumen de los resultados del ensayo D-1 en cada etapa	113
4.14.	Resumen de los resultados obtenidos para los eventos registrados por AE en el ensayo D-1-a; se han resaltado los eventos asociados a la formación de fisuras en la muestra	115
4.15.	Comparación de resultados del criterio aplicado frente a las radiografías	120
4.16.	Comparación de resultados según el criterio empleado para la muestra D-1. Número de fisuras observadas en las radiografías, número de fisuras detectadas por AE y grado de correspondencia	121
4.17.	Resumen de los ensayos realizados para las muestras de los laminados C y D, $n_i^{Xray}(\epsilon_{x,max})$	123

Anexo

An.1.	Relación de radiografías presentadas	133
-------	--------------------------------------	-----

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación

La utilización de materiales compuestos supone uno de los mayores avances en el campo de la ingeniería en la actualidad. El uso de materiales compuestos de fibra de carbono en matriz epoxi (carbono/epoxi) se hace de especial interés en aplicaciones aeronáuticas, tanto comerciales como militares.

En los últimos años, los materiales compuestos han dominado la industria, sustituyendo el uso de otros materiales y orientándose hacia nuevos mercados.

A medida que se ha ido mejorando en su diseño y fabricación, los materiales compuestos carbono/epoxi han comenzado a ser empleados en la fabricación de estructuras más comprometidas y con unos requerimientos mayores.

Los laminados de material compuesto tienen numerosas aplicaciones en diferentes campos. No obstante, estos laminados están afectados por diferentes modos de daño, tales como la fisuración de la matriz, el deslizamiento fibra-matriz o la rotura de las fibras.

La predicción de la iniciación del daño, el crecimiento y la propagación hasta fractura son de vital importancia para evaluar la capacidad de carga, la tolerancia al daño y la seguridad de las estructuras de material compuesto. [8]

Existen determinados diseños en los que la presencia de daño no implica el fallo de los mismos. Sin embargo, la aparición de daño en un material puede provocar la degradación de sus propiedades mecánicas, con la correspondiente reducción de la capacidad de carga, así como otros efectos adversos, como el filtrado de fluidos a través de fisuras en la matriz o deslaminaciones.

Uno de los parámetros que determina el estado del daño de una lámina por fisuración de la matriz es la densidad de fisuras (λ). Este parámetro viene definido por el número de fisuras por unidad de longitud presentes en la lámina. Por tanto, la motivación de este proyecto surge para dar respuesta al problema de la determinación del número de fisuras en un laminado a medida que aumenta la carga a la que está sometido.

1.2 Objetivos

Los objetivos de este proyecto son los siguientes:

- La obtención de la curva que representa la densidad de fisuras frente a la deformación longitudinal en un material compuesto laminado de fibra de carbono en matriz epoxi.
- La evaluación de la idoneidad de un sistema de Emisiones Acústicas (AE) para la detección de fisuras en materiales compuestos laminados, utilizando un sistema de rayos-X para su validación.

En primer lugar, se han fabricado varios laminados de material compuesto para ser ensayados posteriormente en una Máquina Universal de Ensayos (MTS).

El material utilizado es un prepreg fabricado por Advanced Composites Group, perteneciente a los materiales creados para ser curados fuera de un autoclave. Se trata del MTM45-1 y se utiliza principalmente para la industria aeroespacial.

Una vez la placa de material ha sido fabricada y curada mediante el método de bolsa de vacío en un horno, se procede a su corte, para la obtención de muestras que serán ensayadas en la máquina universal.

Esta máquina aplica una carga de tracción a la muestra provocando la aparición de fisuras en el interior del material.

Para contabilizar el número de fisuras y al mismo tiempo obtener el nivel de deformación en las muestras durante el ensayo, se ha empleado un sistema de Emisiones Acústicas (AE) que no había sido utilizado anteriormente.

La ventaja que ofrece este nuevo sistema es su capacidad para detectar las fisuras a medida que van apareciendo, sin tener que detener el ensayo para introducir la muestra en una máquina de rayos-X cada vez que se desee verificar la aparición de nuevas fisuras.

Para comprobar la validez de los resultados del sistema de Emisiones Acústicas, se ha medido visualmente la densidad de fisuras mediante radiografías de las muestras.

Las secuencias de apilamiento de los laminados ensayados con este sistema están basados en los ensayos realizados por Varna et. al [31].

1.3 Estructura de este proyecto

Este proyecto está dividido en tres partes.

En la primera parte, denominada revisión de literatura, se hace referencia a diferentes publicaciones y libros de diversos autores en los que se explica la aparición de fisuras transversales en un material sometido a una carga en el plano en la dirección perpendicular a las fibras (sección 2.1). El estudio de este tipo de daño se lleva acabo de forma experimental y mediante modelos analíticos, llegando a coincidir en muchos casos los resultados obtenidos por los diferentes autores.

En la sección 2.2 se explican algunos procesos de fabricación de materiales compuestos, tales como el clásico moldeo a mano o mediante el uso de prepregs.

En este capítulo también se describen los materiales preimpregnados, así como sus diferentes tipos y los parámetros más importantes que caracterizan a este tipo de materiales.

También se explica el método de bolsa de vacío, así como los componentes necesarios para llevarla a cabo. Posteriormente, se define el método de procesamiento en autoclave y las ventajas y desventajas de su uso en la industria en la actualidad.

Por último, se habla de los materiales compuestos curados sin necesidad de un autoclave, es decir, mediante el uso de un horno convencional y de las ventajas que presenta este nuevo método.

En la sección 2.3 se hace uso de la documentación proporcionada por diferentes publicaciones para introducir los parámetros utilizados en un sistema de emisiones acústicas, así como el uso de dicho sistema para evaluar los mecanismos de daño en un material compuesto.

En la sección 2.4 se introduce brevemente la técnica de rayos-X, utilizada para visualizar algunos modos de daño en laminados de material compuesto.

La segunda parte del proyecto, denominada desarrollo experimental, está dividida a su vez en siete secciones diferentes.

En la sección 3.1 se realiza un resumen del procedimiento experimental llevado a cabo para la realización de los ensayos.

En la sección 3.2 se explica en detalle cómo se ha fabricado el material compuesto utilizado para la realización de los ensayos. Se muestran los diferentes laminados fabricados,

así como sus respectivas orientaciones. También se muestran las características del material y el ciclo de curado realizado. Por último se detalla la fabricación de la bolsa de vacío, así como los componentes necesarios.

En la sección 3.3 se explica la forma de preparar las muestras antes de ser ensayadas: el corte, la colocación de las galgas extensométricas, la de los micrófonos y la de los tabs.

En la sección 3.4 se describe la máquina de ensayos utilizada y sus diferentes componentes.

En la sección 3.5 se introduce la máquina de raxos-X empleada y el modo de uso. Se explica el procedimiento que se debe llevar a cabo para preparar las muestras antes, durante y después de su exposición a los rayos-X. Se detalla desde la preparación del líquido penetrante y su aplicación sobre la muestra hasta el tiempo de exposición y revelado.

En la sección 3.6 se describe el sistema de Emisiones Acústicas (AE) empleado, los componentes que lo forman (micrófonos, preamplificadores y tarjeta de adquisición de datos) y los parámetros básicos necesarios para realizar el análisis.

En la sección 3.7 se presenta un esquema del sistema completo, formado por la máquina universal de ensayos, el sistema de emisiones acústicas y el acondicionador de señal de la deformación.

La tercera parte del proyecto se denomina resultados experimentales y explica los diferentes ensayos realizados para cada uno de los laminados fabricados.

En la sección 4.1 se describen dos laminados en los que domina el modo I de fractura: el laminado A, con una configuración $[0/90_8/0]$ y el laminado B, con una configuración $[+25/-25/90_{10}/-25/+25]$. Para cada uno de ellos se realiza una validación y un filtrado de las emisiones acústicas, comparando los resultados obtenidos por el sistema AE con los resultados proporcionados por la máquina de rayos-X. Por último, se representa la densidad de fisuras frente a la deformación longitudinal para cada uno de los laminados.

En la sección 4.2 se describen dos laminados en los que aparece también el modo II de fractura: el laminado C, con una configuración $[0/+55_4/-55_4/0/-55_4/+55_4/0]$ y el laminado D, con una configuración $[0/+70_4/-70_4/0/-70_4/+70_4/0]$. Para cada uno de ellos se realiza una validación y un filtrado de las emisiones acústicas, comparando los resultados obtenidos por el sistema AE con los resultados proporcionados por la máquina de rayos-X. Por último, se representa la densidad de fisuras frente a la deformación longitudinal para cada uno de los laminados, comprobando la validez del sistema.

Capítulo 2

Revisión de literatura

2.1. Aparición de fisuras transversales

Siempre que se fabrica un material, aparecen inevitables defectos durante el proceso de producción, tales como vacíos, microfisuras, etc. Todos ellos pueden representarse como una fisura en la matriz de longitud $2a_0$. [5]

La aparición de fisuras en la matriz provoca una reducción en la rigidez del material y lleva consigo una redistribución de la tensión hacia las láminas adyacentes. La fisuración de la matriz provoca también un incremento en la permeabilidad del material, lo que induce un acceso para líquidos y gases contaminantes hacia las fibras, provocando una degradación en las fibras y en la interfaz fibra-matriz. [6,7]

Cuando se aplica una carga en el plano en la dirección perpendicular a las fibras, el primer modo de fallo que se observa es el de rotura transversal de la matriz en las láminas orientadas fuera del eje de aplicación de carga. Aunque la fisuración de la matriz no es un fallo catastrófico, su presencia provoca la iniciación de otros modos de fallo, tales como deslaminación, separación fibra-matriz o rotura de fibras, que generalmente llevan a la rotura del material. [10]

Esta serie de fisuras paralelas (figura 2.1) reduce la resistencia de la lámina fisurada, redistribuyendo la carga aplicada entre las láminas restantes. En cada lámina, el daño causado por esta serie de fisuras se representa por la densidad de fisuras (λ), definida como la inversa de la distancia entre dos fisuras adyacentes $\lambda = \frac{1}{(2l)}$ [5]

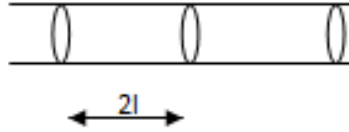


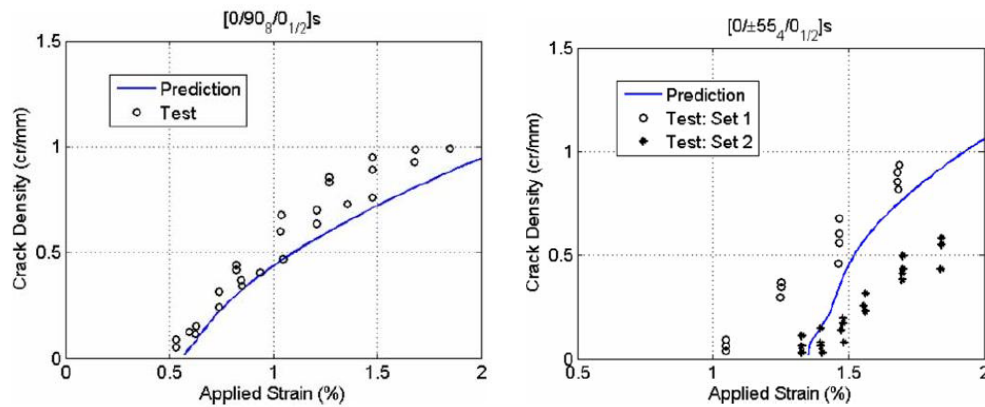
Figura 2.1. Representación esquemática de la distancia entre dos fisuras consecutivas

La predicción de la iniciación y la evolución de fisuras en un laminado de materiales compuestos es un problema con una gran relevancia hoy en día. Se han estudiado numerosos modelos para evaluar y contabilizar este problema, generalmente mediante el uso de elementos finitos.

En las siguientes gráficas (figura 2.2) se muestra la densidad de fisuras frente a la deformación para diferentes laminados con las siguientes secuencias de apilamiento:

- $[0/90_8/0_{1/2}]_s$
- $[0/\pm 55_4/0_{1/2}]_s$
- $[0/\pm 70_4/0_{1/2}]_s$

Estas gráficas fueron obtenidas mediante un modelo analítico de elementos finitos (línea azul) [10] y mediante resultados experimentales (puntos negros).[31]



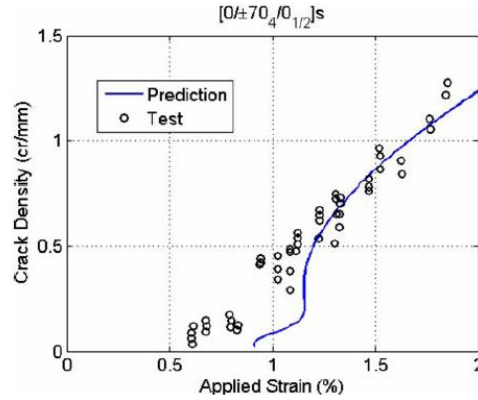
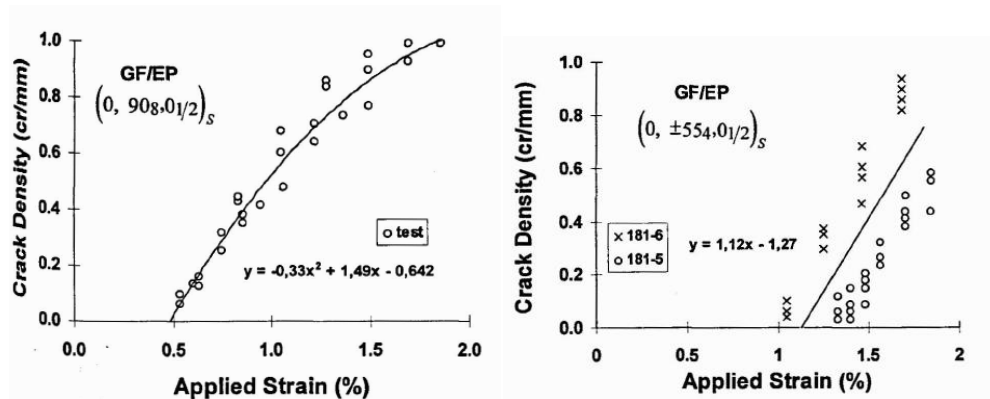


Figura 2.2. Gráficas que muestran la densidad de fisuras frente a la deformación para tres laminados con diferentes orientaciones (modelo analítico y resultados experimentales). El material empleado es fibra de vidrio-E/epoxi.

A la vista de los resultados anteriores se puede concluir que la predicción de la iniciación y la evolución del daño (densidad de fisuras frente a deformación) obtenida con el modelo de elementos finitos es buena para los tres casos. No obstante, la predicción en el comienzo de la deformación para el caso del laminado con láminas a 70° no es tan buena como la obtenida con el resto de laminados. [10]

En las siguientes gráficas (figura 2.3) se muestran los resultados obtenidos experimentalmente por Varna et al [31] sobre la densidad de fisuras frente a la deformación en laminados del tipo $[0/\pm\theta_4/0_{1/2}]_s$.



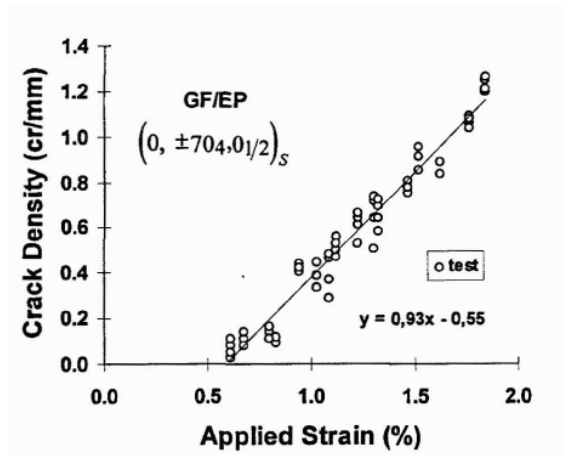


Figura 2.3. Gráficas que muestran la densidad de fisuras frente a la deformación para tres laminados con diferentes orientaciones (resultados experimentales)

Generalmente, la aplicación de una carga en un laminado cruzado (laminado únicamente con fibras a 0° y a 90°) produce la aparición de fisuras en las láminas a 90° cuando la carga es aplicada en la dirección de las láminas de 0° , pero puede aparecer en otros casos.

Se ha demostrado que pueden aparecer fisuras en la matriz de laminados equilibrados $[0/\pm\theta_4/0_{1/2}]_s$ para ángulos no inferiores a 40° [31]. Otros autores han observado la aparición de fisuras en la matriz en láminas con ángulos no inferiores a 30° en laminados no equilibrados $[0/\theta/90]_s$. [33, 34]

Cabe destacar que una importante fuente de inelasticidad en un laminado de material compuesto formado por constituyentes elásticos es la fisuración de la matriz dentro de las láminas del laminado.

Las deformaciones inelásticas son producidas por los desplazamientos superficiales de las fisuras de la lámina en respuesta a la carga aplicada. Estos desplazamientos de la superficie no ocurren con libertad, como ocurriría si las fisuras estuvieran en una lámina con espesor infinito, ya que están afectados por la rigidez y la geometría de las láminas vecinas. [32]

Existen dos tipos de daño en un laminado de material compuestos referentes a la rotura de la matriz (fallo no catastrófico):

- Un tipo de daño consiste en la aparición de múltiples fisuras paralelas a las fibras en las láminas que están orientadas en dirección transversal a la de aplicación de carga.
- Un segundo tipo de daño consiste en la deslaminación interlaminar, la cual ocurre con frecuencia cerca del borde libre del laminado.

La densidad de fisuras transversales crece hasta un nivel máximo en función de las características de la construcción del laminado y de las condiciones de carga. Sin embargo, el grado de deslaminación crece de forma continuada hasta que ocurre la fractura de las fibras y, por tanto, el fallo del material compuesto. Ambos modos de daño perjudican a la durabilidad y a la confiabilidad estructural del laminado de material compuesto.

La secuencia de acumulación del daño en los laminados de material compuesto depende fuertemente de la construcción del laminado y de la secuencia de apilamiento. [11]

A pesar de los grandes avances, todavía no existe una formulación completa de los mecanismos de daño en un material compuesto. [16]

2.2 Procesos de fabricación de materiales compuestos

2.2.1 Fabricación por moldeo a mano y mediante el uso de preregs

Existen diferentes métodos para la fabricación de materiales compuestos. Cada uno de ellos presenta ciertas ventajas e inconvenientes en relación a las propiedades del producto final y a la facilidad de fabricación del mismo. La elección de uno u otro tiene en cuenta los tipos de fibras y matrices, la temperatura requerida para curar la matriz y el coste total del proceso.

En este proyecto se van a comentar dos métodos diferentes de fabricación de materiales compuestos: el moldeo a mano y mediante el uso de preregs.

Uno de los métodos más utilizados para la elaboración de materiales compuestos de fibra de carbono es el moldeo a mano (hand lay-up). En este proceso, el laminado se coloca sobre el molde deseado y se le aplica una capa de resina líquida. Ésta es distribuida por todo el laminado manualmente hasta conseguir el espesor deseado.

El inconveniente de este método radica en la elevada emisión de volátiles, además de la intensiva y delicada labor del fabricante del mismo y los largos tiempos de curado a temperatura ambiente.

Las ventajas que presenta este método son el bajo coste del equipo empleado y las complejas geometrías que se pueden conseguir.

Otro método cada vez más utilizado es la fabricación mediante el uso de preregs (preg lay-up), en el que láminas de fibra pre-impregnadas de resina (matriz) son apiladas unas sobre otras hasta conseguir la secuencia de apilamiento deseada.

Los preregs son generalmente suministrados en rollos con el ancho deseado para ser cortados en láminas con el tamaño necesario. En el caso de este proyecto, se ha utilizado un rollo de prepeg MTM45-1 de 12 pulgadas (30,5 cm) de ancho, el cual se detallará con precisión en el apartado 3.2.

Los inconvenientes que presenta este proceso son el coste del equipo necesario para el curado del material y el propio coste del material pre-impregnado.

Entre las ventajas que presenta este procedimiento de fabricación cabe destacar el elevado volumen de fibras del material y la uniformidad en la distribución de las mismas así como la simplicidad en su fabricación. [5]

La diferencia básica entre el moldeo mediante prepregs y el tradicional moldeo a mano es que cuando se usa un prepreg la impregnación de las fibras se realiza previamente al moldeo. No obstante, en la tabla 2.1 se resumen las ventajas y desventajas de cada uno de los procesos.

	Prepregs	Moldeo a mano
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo contenido de vacíos • Control del volumen de fibras • Control del espesor del laminado • Bajo coste de mano de obra • Mejor calidad y conformidad • Proceso limpio 	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo coste de materiales • Coste de los equipos mínimo
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor coste del material • El material debe ser almacenado congelado 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor coste de mano de obra debido a la necesidad de operarios con gran habilidad • Mayor contenido de vacíos • Pobre control del volumen de fibras • Pobre control del espesor del laminado • Proceso desordenado • Problemas de seguridad y salud debidos a la resina o a las fibras secas. • Proceso sucio

Tabla 2.1. Ventajas y desventajas de la fabricación de materiales compuestos mediante moldeo a mano y mediante el uso de prepregs

En la figura 2.4 se muestran los procesos descritos anteriormente:



Figura 2.4. Fabricación de materiales compuestos mediante moldeo a mano (izquierda) [35] y mediante el uso de prepregs (derecha) [36]

Otros métodos

Otros métodos de fabricación de materiales compuestos son: enrollamiento continuo (fillament winding), pultrusión (pultrusion), moldeo por transferencia de resina (resing transfer moulding) o moldeo por compresión (compression moulding). Todos estos métodos requieren de un elaborado molde y herramientas y componentes de alto coste para poderse llevar a cabo.

2.2.2 Materiales pre-impregnados

Los prepregs (materiales en láminas PREimPREGnadas) son el formato más utilizado en la actualidad para disponer materiales compuestos en aplicaciones aeroespaciales. También es muy común su utilización para la fabricación de componentes médicos y una gran variedad de productos industriales. [26]

Un material prepreg es un conjunto de fibras pre-impregnadas con resina parcialmente curada en estado B, todavía reactiva. Se compone de un material de refuerzo (carbono, vidrio, etc) en forma unidireccional o tejido pre-impregnado con un nivel predeterminado y controlado de resina (matriz).

Son los materiales ideales para la construcción de piezas ligeras y resistentes, debido a las diferentes formas que existen de manipularlos y a la facilidad del proceso de conformado. Son muy utilizados en la fabricación de piezas de alto rendimiento y geometría compleja.

Muchos prepregs están formados por resina epoxi y un refuerzo de fibras de vidrio, carbono o aramida. En algunos casos, existe un exceso de resina que es necesario eliminar para evitar la formación de vacíos en la pieza final, producidos por el aire y los componentes volátiles atrapados.

Estos materiales se almacenan a baja temperatura, generalmente en refrigeradores, para mantener sus propiedades sin que la resina cure.

Existen diferentes tipos de prepregs en función de la dirección de las fibras en los mismos. Cuando todas las fibras son impregnadas por la resina en una misma dirección del espacio, el prepreg recibe el nombre de unidireccional (figura 2.5).



Figura 2.5. Material prepreg unidireccional [37]

Cuando las fibras están distribuidas en dos direcciones ortogonales, el prepreg recibe el nombre de tejido (figura 2.6).



Figura 2.6. Material prepreg tejido [37]

En este proyecto, el material utilizado es un prepreg unidireccional, el cual ha sido cortado en láminas para su posterior apilado, obteniendo finalmente laminados no unidireccionales.

Todos los prepregs tienen claramente definida una vida de trabajo y una vida fuera del refrigerador (out life). La reactividad de un prepreg dicta la temperatura mínima a la cual la resina será curada.

La vida del prepreg fuera del refrigerador y la temperatura mínima de curado son las consideraciones clave para optimizar el material.

Los parámetros más importantes que caracterizan a un material prepreg se presentan en la tabla 2.2:

Volumen de fibras (%Vf)	Porcentaje de fibras en el prepreg (en volumen). Es clave para determinar el rendimiento del laminado.
Temperatura de transición vítrea (T_g)	Temperatura a la cual ocurre un cambio de fase en la matriz. Se trata de la temperatura por encima de la cual la resina empezará a ablandarse, perdiendo resistencia. Da una indicación de la máxima temperatura final; generalmente suele ser de al menos 20°C por debajo de T _g .
Vida fuera del refrigerador (Out Life)	Periodo de tiempo en el que un prepreg puede usarse a temperatura ambiente (21°C/70°F), sacado del refrigerador a -18°C. Es acumulativa, es decir, aumenta cada vez que el material es sacado del refrigerador.
Fluidez	Capacidad de la resina para moverse bajo presión, permitiendo rellenar todas las partes del laminado.
Peso de la resina (%RW)	Proporción de resina en un prepreg (en peso), contabilizada como un porcentaje del peso total del prepreg.
Vida de almacenamiento (Shelf life)	Tiempo que el prepreg puede estar almacenado bajo condiciones específicas (generalmente -18°C/0°F) y continúa desempeñando su función.
Untuosidad (Tack)	Medida de la capacidad de un prepreg sin curar de adherirse a sí mismo y moldear superficies.
Vida con untuosidad (Tack Life)	Tiempo que el prepreg puede ser almacenado a temperatura ambiente (20°C/68°F), teniendo suficiente untuosidad.
Viscosidad	Medida de las características del flujo de una resina. Está influenciada por la temperatura y las tasas de calentamiento.
Contenido de vacíos	Porcentaje en volumen de vacíos en un laminado curado.
Volátiles	Existen materiales, como el agua o los disolventes, que son capaces de ser expulsados como vapor a temperatura ambiente o a elevadas temperaturas.

2.2.2.1 Precompresión (Debulking)

Consiste en la aplicación de una presión de vacío de forma periódica durante la secuencia de apilamiento para asegurar la consolidación de las láminas entre ellas, mejorando el rendimiento del laminado final.

Un laminado de material compuesto fabricado con prepregs debe ser sometido a una presión de vacío en varias etapas durante el proceso de apilamiento. Este proceso, llamado debulking, asegura que todas las láminas quedan unidas perfectamente. Una vez el conformado de las mismas ha terminado, se realiza la bolsa de vacío para el curado final.

2.2.3 Bolsa de vacío y Autoclave

Bolsa de vacío

El método de bolsa de vacío se basa en la aplicación de una presión en el laminado antes de su curado para consolidar las fibras y eliminar el exceso de resina, aire y volátiles de la matriz.

Las técnicas de bolsa de vacío han sido desarrolladas para fabricar una gran variedad de componentes, pero principalmente para la fabricación de formas complejas. Este método requiere de equipamiento y herramientas de bajo coste y es capaz de producir materiales compuestos avanzados con una gran calidad.

Un film impermeable (release film) es utilizado en ambos lados del laminado para evitar su posible pegado al molde.

A veces, se utiliza una piel (peel ply) para mejorar la unión adhesiva y proporcionar una textura superficial adecuada.

Un respirador (breather) se coloca sobre el resto de materiales para distribuir el vacío a lo largo de la superficie, consiguiendo un vacío uniformemente distribuido.

Por último, el laminado es cubierto por una bolsa (bagging film), perfectamente sellada a la superficie de apoyo sobre la que se está fabricando la bolsa de vacío. Se aplica vacío y se cura el material mediante calor y presión.

En la figura 2.7 se esquematiza una bolsa de vacío con cada uno de los componentes necesarios.

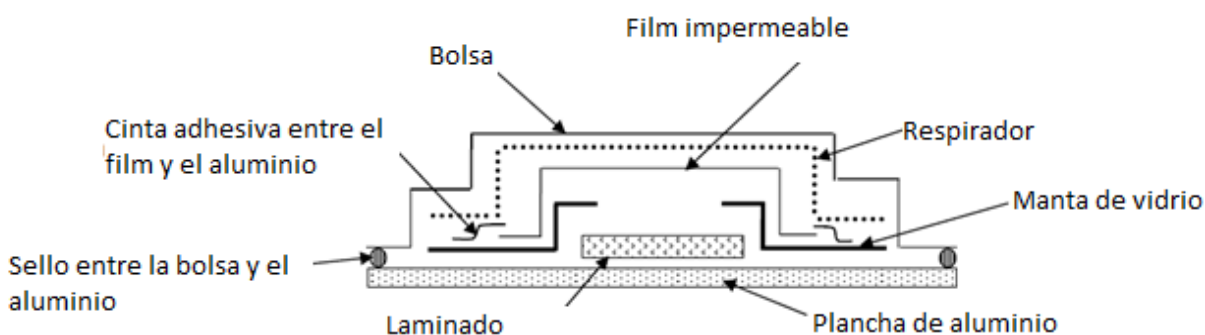


Figura 2.7. Esquema de una bolsa de vacío y sus componentes [3]

No obstante, en la tabla 2.3 se explica con más detalle cada uno de los componentes de una bolsa de vacío así como sus respectivas funciones.

Film impermeable (Release film)	Permite eliminar el vacío del laminado. Puede ser sólido o perforado con varios agujeros para controlar la resina durante el proceso de precompresión y de curado.
Piel del laminado (Peel ply)	Su propósito es el de proteger la superficie y proporcionar una superficie disponible para una segunda unión. Puede estar seco o preimpregnado con la misma resina que el laminado.
Respirador (Breather)	Permite el paso de aire a través de la bolsa del laminado, incluso bajo vacío o presión de autoclave. Esto asegura que el nivel de vacío es homogéneo en toda la superficie.
Bolsa (Bagging film)	Proporciona una bolsa sellada que permite la eliminación de aire para formar la bolsa de vacío. Las bolsas de vacío deben estar herméticamente cerradas para asegurar la ausencia de fugas durante el proceso de curado final.
Sello (Sealant tape)	Crea un sello entre el molde y la bolsa.

Tabla 2.3. Definición de los componentes que forman una bolsa de vacío [2]

En la figura 2.8 se presenta un esquema de una bolsa de vacío en la que se aprecia cada uno de los componentes necesarios.

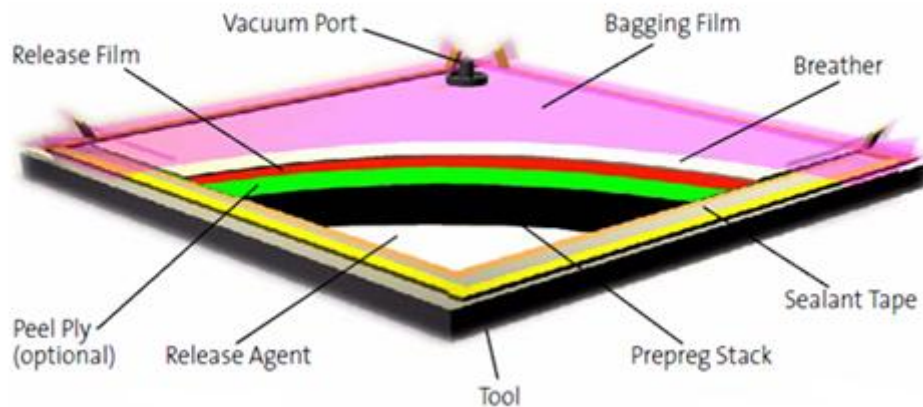


Figura 2.8. Representación de una bolsa de vacío y sus componentes [2]

En la figura 2.9 se muestra una fotografía de una bolsa de vacío terminada, en la que se distinguen cada una de las capas mencionadas anteriormente así como los sellos y adhesivos que permiten la unión de las capas al molde. También se pueden observar las mangueras que permiten la realización del vacío en el interior de la bolsa.

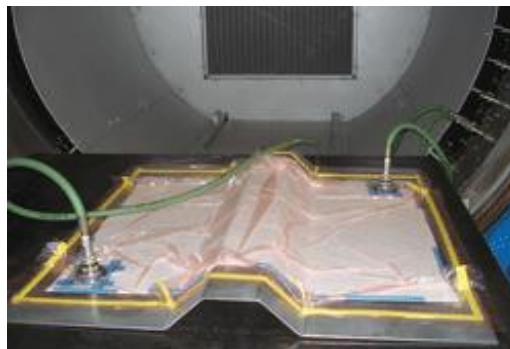


Figura 2.9. Fotografía de una bolsa de vacío [38]

Las bolsas de vacío permiten la producción de materiales compuestos de gran calidad y bajo coste, debido a que el equipo empleado puede ser utilizado para la fabricación de un gran número de piezas.

Autoclave

Un autoclave es un recipiente que genera calor y presión en su interior. Puede tener grandes dimensiones. El moldeo en autoclave es similar al proceso de bolsa de vacío, pero con la excepción de que el laminado en verde está sujeto a una presión adicional, generalmente en el rango entre 3,5 hasta 7 bar, mientras se aplica calor para curar la resina (figura 2.10).

El método de procesado por autoclave consiste en la generación de presión mediante la compresión de un gas. Proporciona piezas de gran calidad y formas complejas. Se utiliza para la fabricación de cantidades muy pequeñas de grandes piezas, ya que son equipamientos muy caros y con una tasa de producción muy baja.

Generalmente se aplica vacío durante las primeras etapas del ciclo de curado para eliminar los volátiles y el aire atrapado. La presión se debe mantener durante el ciclo de calentamiento y enfriamiento.

El proceso de moldeo en autoclave produce laminados de elevada calidad con un mínimo contenido de volátiles. El control del espesor del laminado es mucho mejor que el que se consigue con el método de moldeo en bolsa de vacío.

El coste del equipamiento y de las herramientas necesarias es mucho mayor, la tasa de producción es relativamente baja y el coste de producción es alto. Estas restricciones hacen que su uso quede limitado a la producción de piezas donde la calidad es el factor fundamental. Grandes estructuras primarias para aviación, tales como alerones, alas, fuselajes...están fabricadas mediante este método para garantizar de esta manera su reproducibilidad.

En resumen, a pesar de que los autoclaves proporcionan una gran calidad en el producto final con un bajo contenido de volátiles, también presentan ciertos inconvenientes, como son:

- Elevado coste de inversión.
- Tamaño restringido por la estructura del material compuesto que se desee producir.
- Elevadas temperaturas y presiones requeridas, lo que se traduce en equipos y herramientas muy costosos.

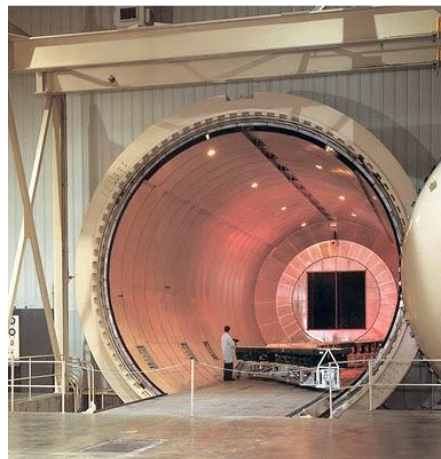


Figura 2.10. Fotografía de un autoclave [39]

2.2.4 Curado de materiales sin utilizar autoclave

El curado de un material compuesto es la transformación química y física del material a su forma final. Existe una transición del material de estado líquido o viscoso a estado sólido.

Las propiedades de la resina (matriz) en ambos estados son muy importantes para alcanzar las propiedades mecánicas finales del laminado.

Las resinas que no requieren de curado en autoclave son relativamente nuevas y están siendo adoptadas rápidamente ya que el tamaño de las piezas no queda limitado por el tamaño del autoclave disponible.

Además, las propiedades de los materiales obtenidos mediante post-curado (con las mismas temperaturas que en un autoclave pero utilizando un simple horno) se aproximan a las obtenidas mediante el curado de materiales compuestos utilizando autoclave. [9]

Los prepregs curados sin utilizar autoclave (out-of-autoclave prepregs) representan una clase emergente de materiales prepregs diseñados específicamente para ser curados en un horno mediante una bolsa de vacío.

Este tipo de materiales ha sido muy útil en la industria debido a la reducción del coste en el equipamiento necesario para su curado. La sustitución del autoclave por un horno, mucho más barato y de dimensiones más reducidas, ha permitido a los pequeños fabricantes de materiales compuestos entrar en nuevos mercados y poder competir con empresas más fuertes dotadas de equipos más potentes.

El curado fuera de autoclave solamente proporciona presiones máximas de 1 atm, ya que no se realiza ninguna inyección de presión. Únicamente se extrae el aire contenido en la bolsa que cubre al material, obteniendo así el vacío.

2.3. Técnica de Emisiones Acústicas

El uso de un sistema de Emisiones Acústicas (AE) permite realizar una inspección continua del daño, así como una identificación y clasificación de los modos de fallo de un material compuesto en tiempo real. Esta técnica permite tomar medidas preventivas para evitar el fallo catastrófico del material.

La técnica de AE requiere de un análisis y una calibración preliminar para cada material, geometría y tipo de carga. Con esto se podrá distinguir entre diferentes tipos de mecanismos de daño y fallo. Las frecuencias umbral son dependientes del material y es necesario ajustarlas con precisión para filtrar los falsos ruidos. [29]

La técnica de emisiones acústicas ha ido incrementando su popularidad en diversos campos de la ingeniería.

Los componentes de un sistema AE son: sensor, preamplificador, filtro, amplificador de potencia, línea de transmisión, umbral (threshold), instrumentación para registrar y cables de señal. [15]

En la siguiente gráfica (figura 2.11) se muestra la amplitud frente a la energía de una probeta general. Se puede observar como la mayor liberación de energía corresponde a la rotura de las fibras.

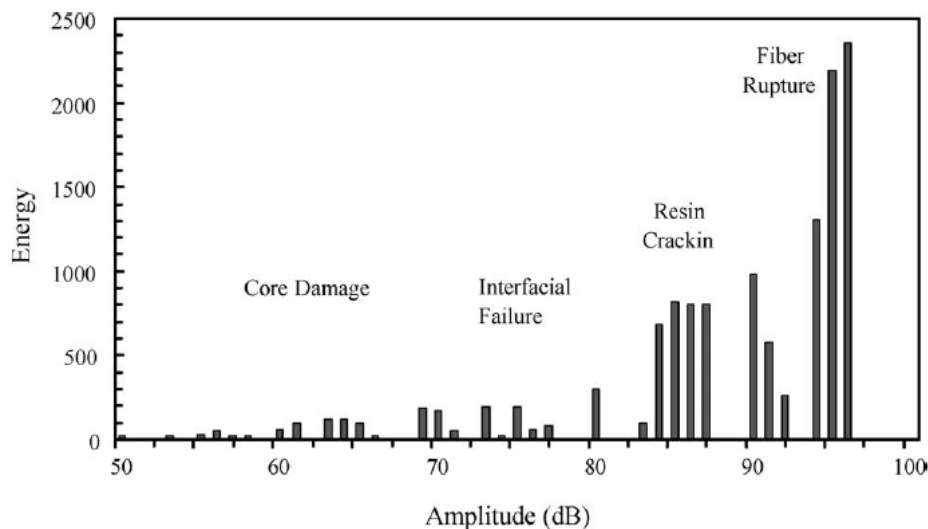


Figura 2.11. Liberación de energía en función del tipo de mecanismo de daño

Para realizar una detección del daño, de la iniciación y del crecimiento de fisuras, se han realizado estudios basados simultáneamente en el análisis de eventos, energía, tiempo, amplitud y localización [29].

Los resultados obtenidos por un sistema de AE están afectados por diferentes características de la instrumentación. La característica más importante es la sensibilidad del sistema.

De todos los parámetros y componentes que afectan a la sensibilidad, el sensor de AE es uno de los más propensos a sufrir variaciones. Estas variaciones pueden ser el resultado de un daño o de la edad. Para detectar estas variaciones, es recomendable tener un método para medir la respuesta del sensor a una onda acústica.

Se ha comprobado la validez de los sensores acústicos mediante la generación de ondas acústicas repetibles, es decir, señales acústicas con las mismas características [16]. La respuesta de los sensores a estas señales es coherente y verifica la repetibilidad de la captación de emisiones acústicas.

Una onda acústica repetible puede ser generada mediante la rotura de una mina de grafito contra la muestra. Cuando las minas se rompen, aparece una liberación repentina de energía en la superficie de la probeta donde la mina está en contacto. Esta liberación de energía genera una onda acústica.

Se debe utilizar una mina de 0,3 mm de diámetro (0,5 mm también es aceptable), mostrando especial cuidado para que todas las minas tengan la misma longitud y sean del mismo tipo (longitudes de entre 2 y 3 mm). Se deben romper todas las minas con el mismo ángulo y orientación del portaminas [14, 28].

Diversos estudios han utilizado métodos de Emisiones Acústicas para analizar la evolución del daño y la detección de los mecanismos de fallo en materiales compuestos de fibra de vidrio, carbono, aramida e incluso fibras naturales [13].

También se ha utilizado este sistema para la evaluación de materiales compuestos de matriz metálica [27].

2.4 Técnica de rayos-X

La técnica de rayos-X se utiliza para visualizar algunos modos de daño en laminados de material compuesto, tales como la deslaminación o la fisuración de la matriz (figura 2.12). Yokozeki et al [33] utilizan esta técnica para analizar fisuras en la matriz de un laminado de material compuesto con las siguientes configuraciones: $[0/\theta/90]_s$ y $[0/\theta_2/90]_s$.

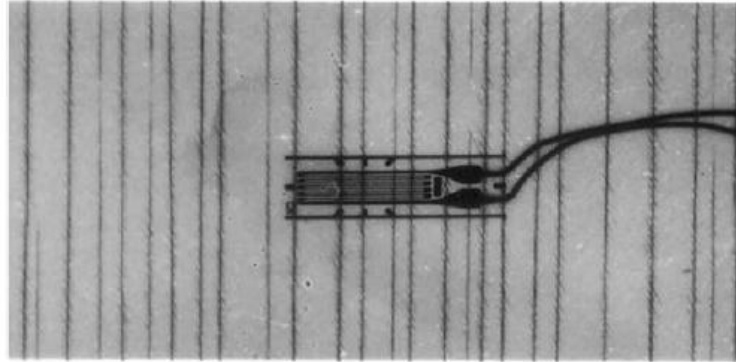


Figura 2.12. Radiografía de una probeta de fibra de carbono/epoxi sometida a una deformación de 1,33% [33]

Una característica que diferencia a esta técnica de otras es que permite visualizar el daño posteriormente a su aparición.

Un líquido penetrante, formado por yoduro de zinc y aplicado sobre los bordes libres de la probeta, es usado por varios autores [33] para obtener una radiografía clara de los resultados. Este líquido penetra por capilaridad a través de las fisuras del material, permitiendo la visualización de las mismas una vez se ha realizado la radiografía. Otros autores [11] utilizan como líquido penetrante una solución con di-yodobutano (DIB).

Esta técnica de visualización de fisuras mediante radiografías sustituye a técnicas anteriores basadas en la observación directa del borde de las probetas por medio de un microscopio.

Capítulo 3

Desarrollo Experimental

3.1 Resumen del procedimiento experimental

El apartado experimental de este proyecto se ha desarrollado en los laboratorios de la West Virginia University (Morgantown, EE.UU) bajo la tutela del Dr. Ever J. Barbero.

Dentro de esta sección experimental se diferencian dos puntos: la fabricación del material compuesto y el procedimiento para la realización de los ensayos.

Con respecto a la fabricación del material compuesto, se ha desarrollado un procedimiento para llevarla a cabo mediante la técnica de bolsa de vacío (sección 3.2).

El horno en el que ha sido curado el material ha sido rediseñado para cumplir con las necesidades requeridas en el proceso de curado del mismo. Estas modificaciones tienen por objeto permitir un control de la temperatura preciso y mantener una presión de vacío durante todo el proceso de curado [24]. La modificación del horno no se describe en este proyecto.

Tras el ciclo de curado se obtiene una plancha del laminado en cuestión. Una vez obtenido el laminado se procede a la preparación de las probetas para su posterior ensayo (sección 3.3).

En cuanto a los ensayos realizados, éstos constan de dos fases:

- En la primera fase se lleva a cabo un ensayo de tracción sobre una probeta del laminado (sección 3.4). En este ensayo la deformación y los eventos capturados son registrados por el sistema de Emisiones Acústicas (sección 3.6). Con este sistema se pretende detectar la formación de fisuras transversales en la matriz del material compuesto.
- En la segunda fase se dispone de una máquina de rayos-X con la que se visualizan las fisuras generadas en la probeta ensayada (sección 3.5). Esta fase permite verificar los resultados obtenidos por el sistema AE y con ello establecer un criterio con el que diferenciar las emisiones acústicas generadas al formarse una fisura del resto de señales (capítulo 4).

3.2 Fabricación del Material

3.2.1 Descripción del material

El material utilizado en este proyecto es un prepreg curado fuera de autoclave (out-of-autoclave prepreg) MTM45-1/IM7-GP-145-32%RW (carbono/epoxi) producido por Advanced Composites Group (ACG). [3, 17]

El material MTM45-1 se utiliza en la industria aeroespacial, especialmente en la fabricación de componentes estructurales, prototipos de aviación, vehículos no tripulados (UAVs), estructuras espaciales y componentes para misiles.

Se trata de un material que ofrece cierta flexibilidad en la temperatura de curado y altas prestaciones. Puede ser curado a baja presión mediante bolsa de vacío, como se ha realizado en este proyecto, o puede curarse usando un autoclave.

Ofrece una combinación de propiedades que lo convierte en un buen candidato para una producción sin autoclave de estructuras primarias para la industria aeronáutica. También puede ser utilizado para la producción de estructuras no tan críticas, como los carenados, típicamente producidas usando autoclave.

Las características que presenta el material MTM45-1 son las siguientes:

- Permite una variación en la temperatura de curado desde 80°C hasta 180°C
- Presenta una excelente tolerancia al daño.
- Ofrece una reducción del 4% del peso del laminado en comparación con las matrices estándar utilizadas en la industria aeroespacial.

En la tabla 3.1 se muestran las características del material empleado:

- FAW (Fiber Areal Weight) es la masa por unidad de superficie de la lámina. Este parámetro se representa en unidades de g/m².
- %RW (Resin Weight) es el porcentaje en peso de resina en el material.
- %VF (Fiber Volumen Fraction) es el porcentaje en volumen de fibras en el material.
- CPT (Cured Ply Thickness) es el espesor de la lámina curada. Este parámetro se representa en unidades de mm.

ACG Nomenclatura	Fibra/Estilo	FAW (g/m ²)	%RW	%VF	CPT (mm)
MTM45-1/IM-7- 145gsm-32R%W	IM7/Unidireccional	145	32	58,72	0,140

Tabla 3.1. Características de las láminas utilizadas [1]

En la figura 3.1 se muestran dos fotografías del material MTM45-1 durante el proceso de apilamiento de las láminas en diferentes orientaciones.

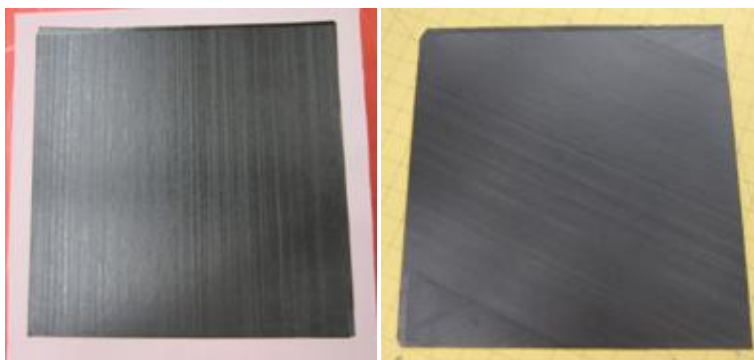


Figura 3.1: Material MTM45-1 durante el proceso de apilado de las láminas

En la figura 3.2 se muestra el rollo de material prepreg proporcionado por Advanced Composites Group. El rollo tiene una anchura de 30,5 cm (12 pulgadas).

Cada una de las láminas ha sido cortada con una determinada longitud en función de la orientación necesaria.

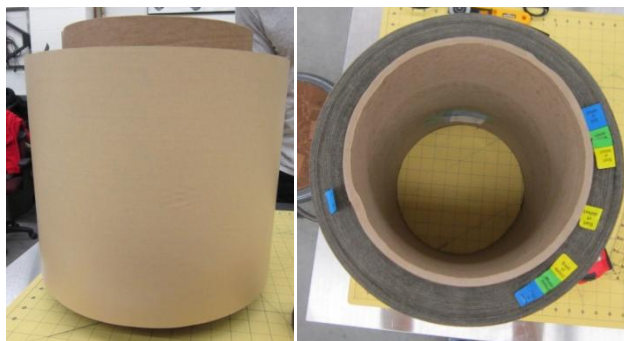


Figura 3.2. Rollo de material prepreg MTM45-1

Se han ensayado cuatro laminados con diferentes secuencias de apilamiento. En la tabla 3.2 se muestra cada una de las configuraciones.

<i>Laminados</i>	<i>Secuencia de apilamiento</i>
A	$[0/90_4]_s$
B	$[\pm 25/90_5]_s$
C	$[0/\pm 55_4/0_{1/2}]_s$
D	$[0/\pm 70_4/0_{1/2}]_s$

Tabla 3.2. Laminados ensayados

A continuación se presenta un esquema para la obtención de la longitud de cada una de las láminas en función de su orientación dentro del laminado. De esta manera, el material será aprovechado de forma óptima.

Para el laminado A, que posee una secuencia de apilamiento $[0/90_4]_s$, se han cortado láminas de 12 x 12 pulgadas (30,5 x 30,5 cm) tanto para las láminas orientadas a 0° como para las láminas orientadas a 90° . En la figura 3.3 se representa el laminado fabricado (línea discontinua), del cual se ha despreciado una pulgada desde los bordes, obteniendo así la plancha de laminado a partir de la que se cortan las probetas (línea continua gruesa). Los bordes se han desechado debido a que la pieza superior del molde tiene unas dimensiones de 11 x 11 pulgadas (27,9 x 27,9 cm).

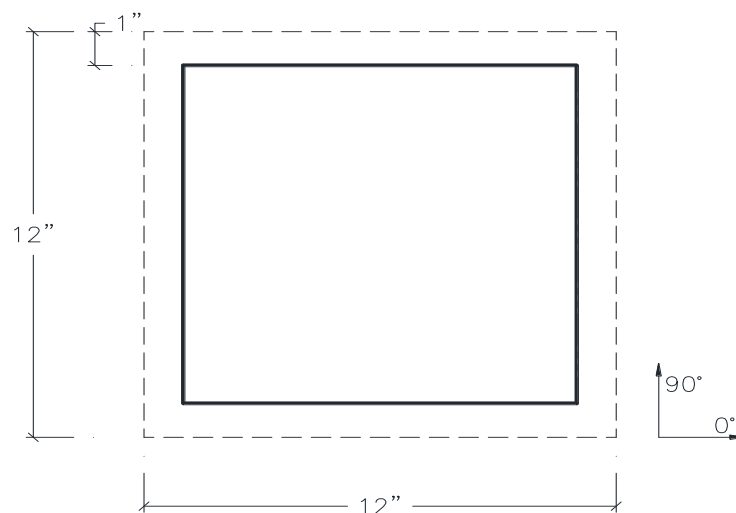


Figura 3.3. Representación esquemática del laminado A

Para el laminado B, que posee una secuencia de apilamiento $[\pm 25/90_5]_s$, se han cortado láminas de 12 x 12 pulgadas (30,5 x 30,5 cm) para las láminas orientadas a 90° y láminas de 16 x 12 pulgadas (40,6 x 30,5 cm) para las láminas orientadas a $\pm 25^\circ$, tal y como se muestra en la figura 3.4.

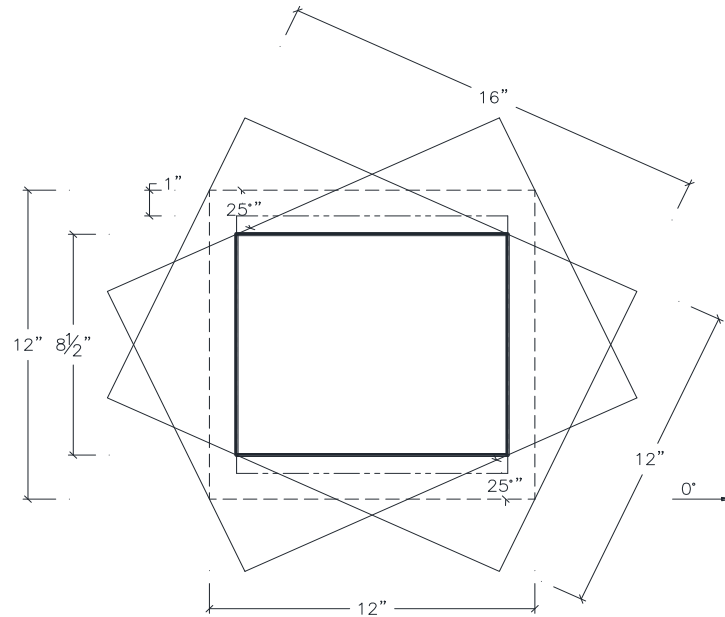


Figura 3.4. Representación esquemática del laminado B

Para el laminado C, que posee una secuencia de apilamiento $[0/\pm 55_4/0_{1/2}]_s$, se han cortado láminas de 12 x 12 pulgadas (30,5 x 30,5 cm) para las láminas orientadas a 0° y láminas de $16 \frac{3}{4} \times 12$ pulgadas (42,5 x 30,5 cm) para las láminas orientadas a $\pm 55^\circ$, tal y como se muestra en la figura 3.5.

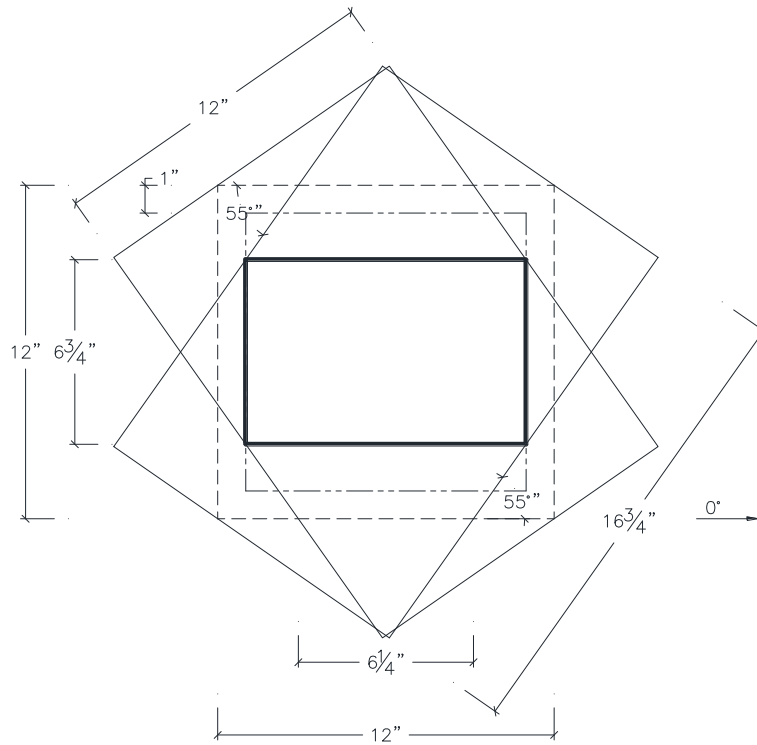


Figura 3.5. Representación esquemática del laminado C

En la figura 3.6 se muestra una fotografía del laminado C durante el proceso de apilado de las láminas orientadas a 55°.

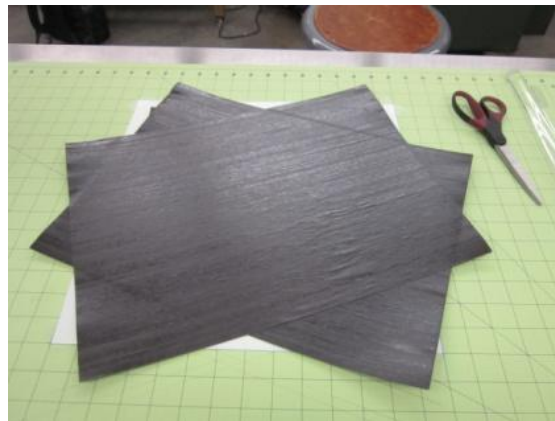


Figura 3.6. Imagen con la disposición de las láminas del laminado C

Para el laminado D, que posee una secuencia de apilamiento $[0/\pm 70_4/0_{1/2}]_s$, se han cortado láminas de 12 x 12 pulgadas (30,5 x 30,5 cm) para las láminas orientadas a 0° y láminas de $15\frac{1}{2} \times 12$ pulgadas (39,4 x 30,5 cm) para las láminas orientadas a $\pm 70^\circ$, tal y como se muestra en la figura 3.7.

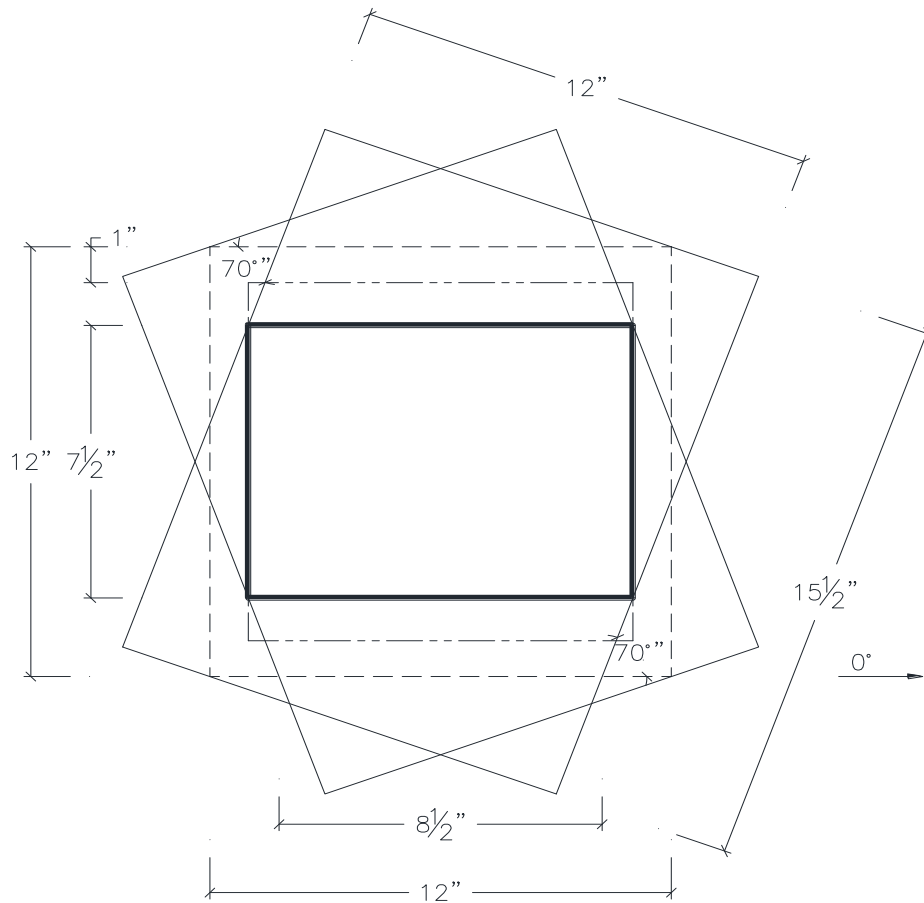


Figure 3.7. Representación esquemática del laminado D

En la tabla 3.3 se muestran las propiedades mecánicas del material MTM45-1, obtenidas del documento [1]. No obstante, estas propiedades son únicamente de interés informativo.

E₁	22,90 Msi (157,89 GPa)
E₂	1,11 Msi (7,65 GPa)
v₁₂	0,36
G₁₂	0,52 Msi (3,59 GPa)
F_{1t}	357,65 ksi (2465,9 MPa)
F_{1c}	181,54 ksi (1251,7 MPa)
F_{2t}	7,59 ksi (52,3 MPa)
F_{2c}	27,96 ksi (192,8 MPa)
F₆	6,93 ksi (47,8 MPa)

1 Msi = 6894,76 MPa

1 ksi = 6,89 MPa

Tabla 3.3. Propiedades mecánicas del material empleado

3.2.2 Ciclo de curado

El material MTM45-1 puede ser curado a una temperatura mínima de 80°C, en un horno y a presión atmosférica, permitiendo el uso de herramientas de bajo coste para la realización de prototipos y bajas producciones de piezas. No obstante, es recomendable la realización del curado a 120°C durante un tiempo mínimo de 4 horas y un post-curado a 180°C para alcanzar las máximas prestaciones y propiedades mecánicas.

El ciclo de curado se puede dividir en dos etapas claramente diferenciadas, una de ellas denominada curado inicial y a continuación otra etapa de post-curado del material.

Las posibilidades que ofrece el material MTM45-1 en función del proceso utilizado aparecen reflejadas en la tabla 3.4 que se presenta a continuación:

Etapas de curado inicial

	Procesado en bolsa de vacío	Procesado en autoclave
Velocidad de calentamiento	1 – 3°C/minuto	1 – 3°C/minuto
Presión	N/A	89 – 207 inHg (3 a 7 bar)
Presión de vacío	> 28 inHg (950 mbar)	> 28 inHg (950 mbar)
Ciclo de curado	20 horas a 80°C ó 4 horas a 120°C ó 2 horas a 130°C	20 horas a 80°C ó 4 horas a 120°C ó 2 horas a 130°C ó 2 horas a 180°C

Tabla 3.4. Características del proceso de curado del material MTM45-1 mediante el proceso de bolsa de vacío y de autoclave

En este proyecto se ha realizado el procesamiento del material mediante bolsa de vacío. La temperatura de curado utilizada ha sido de 120°C, mantenida durante 4 horas.

Etapas de post-curado

El laminado debe ser post-curado a 180°C durante 2 horas para alcanzar la máxima temperatura de recristalización (T_g) y las mejores propiedades mecánicas posibles.

Pasos para la realización del curado del material

Siguiendo las instrucciones del fabricante descritas anteriormente, se ha realizado un proceso de curado del material consistente en los siguientes pasos:

- 1) Precalentamiento del horno desde la temperatura ambiente (20°C aprox) hasta la temperatura de curado (120°C) a una velocidad de $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Este precalentamiento lleva aproximadamente 40 minutos.
- 2) Mantenimiento de la temperatura inicial de curado (120°C) durante 4 horas.
- 3) Elevación de la temperatura inicial de curado hasta la temperatura de post-curado (180°C) a una velocidad de $0,3^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Este calentamiento supone un tiempo aproximado de 200 min.
- 4) Mantenimiento de la temperatura de post-curado (180°C) durante 2 horas para alcanzar las propiedades mecánicas deseadas.
- 5) Enfriamiento continuo desde la temperatura de post-curado hasta 70°C a una velocidad de $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Este enfriamiento supone un tiempo de 55 min.

Todo el proceso supone un tiempo de 11 horas aproximadamente. En la figura 3.8 se refleja el esquema detallado del proceso descrito anteriormente:

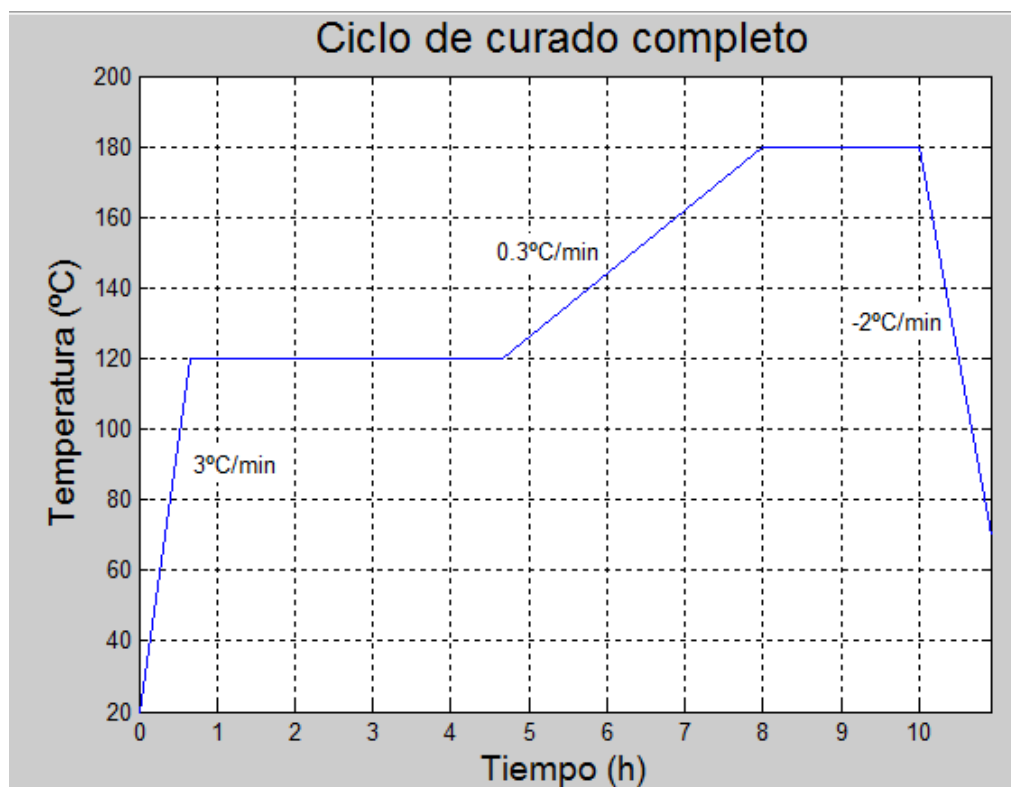


Figura 3.8. Ciclo de curado del material: Temperatura frente a Tiempo

3.2.3 Procesado en bolsa de vacío

En la figura 3.9 se puede apreciar la bolsa terminada, una vez se ha realizado el vacío. Se puede observar la manguera encargada de extraer el aire del interior de la bolsa y dos manómetros encargados de verificar si la presión alcanzada está por encima de 28 InHg (712 mmHg), presión mínima recomendada por el fabricante para poder considerar que se ha alcanzado el vacío.



Figura 3.9. Fotografía de la bolsa de vacío terminada (izquierda) y de algunos de los componentes necesarios para llevarla a cabo (derecha)

La bolsa de vacío realizada consta de los siguientes componentes: [12]

- Plancha de aluminio de 23 x 24 pulgadas (58,4 x 61 cm) y de ½ pulgada (1,27 cm) de espesor. Su finalidad es la de servir de soporte de toda la bolsa.
- Plancha de aluminio de 11 x 11 pulgadas (28 x 28 cm) y 3/8 pulgadas (0,95 cm) de espesor. Junto con la plancha de aluminio anterior, conforma el molde para el laminado.

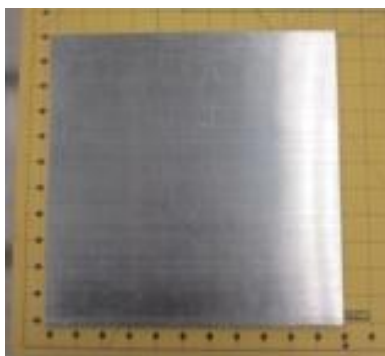


Figura 3.10: Fotografía de la plancha de aluminio

- Sello adhesivo (sealant tape):
 - Este sello permite la unión permanente entre la bolsa y la plancha de aluminio. Su correcta disposición es de vital importancia para conseguir el vacío en el interior de la bolsa.



Figura 3.11. Fotografía del sello adhesivo

- Film impermeable (release film):
 - Se trata de un film resistente a alta temperatura encargado de cubrir ambas planchas de aluminio.
 - Es necesario disponer de dos láminas de este material con diferentes medidas: la de mayores dimensiones, de 21 x 22 pulgadas (53,3 x 55,9 cm), se utiliza para cubrir la plancha de aluminio más grande y es unida a la misma mediante cinta adhesiva de alta temperatura. La más pequeña, de 14 x 14 pulgadas (35,6 x 35,6 cm), se coloca bajo la plancha de aluminio más pequeña.

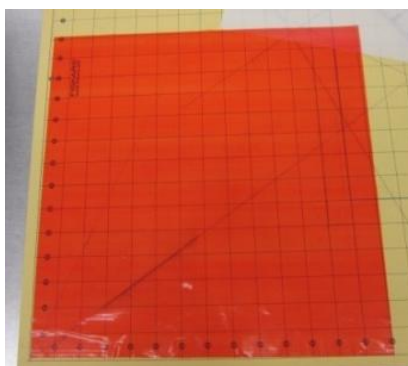


Figura 3.12. Fotografía del film impermeable

- Piel del laminado (peel ply):
 - Son necesarias dos láminas de este material, cada una de ellas con unas dimensiones de 14 x 14 pulgadas (35,6 x 35,6 cm).
 - Su misión es la de dotar al laminado de su textura final.
 - Una vez se ha realizado el curado, estas pieles quedan adheridas al laminado y es necesario despegarlas con cuidado para evitar dañar las fibras del material.



Figura 3.13. Fotografía de la piel del laminado

- Cordón de fibra de vidrio (fiberglass rope):
 - Este cordón tiene la misión de absorber la resina sobrante durante el proceso de curado.
 - Se coloca alrededor del laminado del material prepreg, por lo que es necesario que sean cordones de dimensiones similares a las del laminado, aproximadamente de 13 pulgadas (33 cm).



Figura 3.14. Fotografía del cordón de fibra de vidrio

- Respirador (breather):
 - Su finalidad es asegurar la transmisión del vacío a lo largo de toda la bolsa.
 - Sus dimensiones son de 20 x 21 pulgadas (50,8 x 53,3 cm).

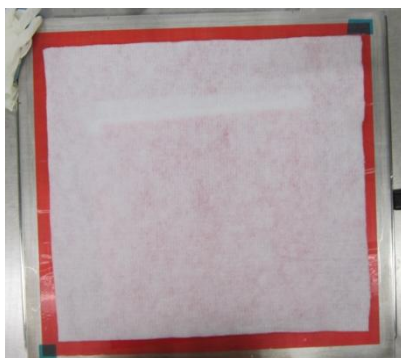


Figura 3.15. Fotografía del respirador

- Bolsa (bagging film)
 - Se trata de un film encargado de cubrir todos los elementos anteriores. Está firmemente unido a la plancha de aluminio inferior mediante el sello adhesivo.
 - Tiene unas dimensiones de 27 x 47 pulgadas (68,6 x 119,4 cm) para cubrir sin ningún problema al resto de materiales.
 - Es necesario realizar unos pliegues (orejas) en el film para encerrar cualquier tipo de arruga que pueda quedar en la superficie del material, pudiendo ocasionar un curado defectuoso.

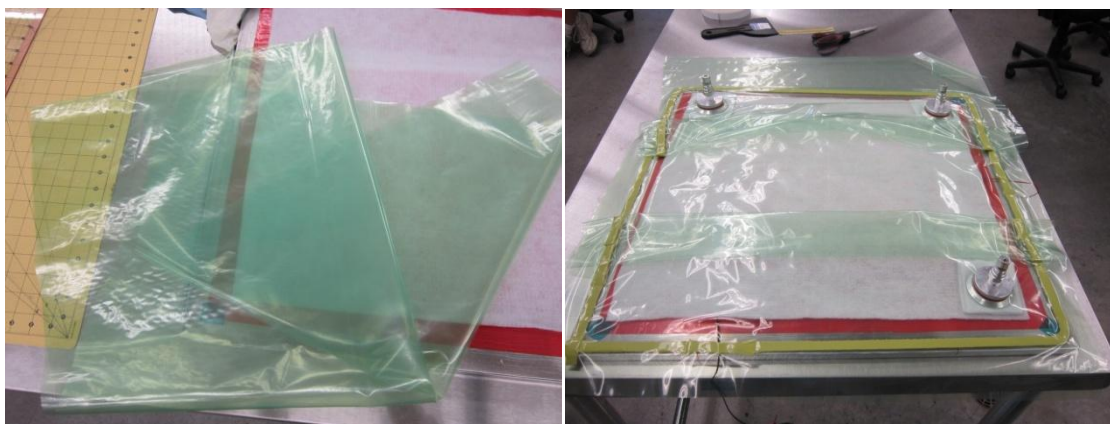


Figura 3.16. Material plástico que forma la última capa de la bolsa (izquierda) y conjunto de la bolsa de vacío terminada (derecha)

3.2.3.1 Procedimiento para la fabricación de la bolsa

Los pasos que se han realizado para conseguir finalmente el vacío en el interior de la bolsa son los siguientes:

- Limpiar la superficie sobre la que se trabaja, una mesa de acero inoxidable, con alcohol isopropílico
- Limpiar las dos planchas de aluminio con alcohol isopropílico
- Colocar la plancha de aluminio de 23 x 24 pulgadas (58,4 x 61 cm) y ½ pulgada (1,27 cm) de espesor sobre la mesa
- Cortar una lámina de 21 x 22 pulgadas (53,3 x 55,9 cm) de film impermeable D5000-0,001 pulgadas (color rojo) y colocarla centrada sobre la plancha de aluminio.
 - Se trata de un material impermeable, cuya misión es la de evitar el contacto directo entre la plancha de aluminio y la lámina de la piel (peel ply), impidiendo así la contaminación del aluminio hacia el material.
- Cortar una lámina de 14 x 14 pulgadas (35,6 x 35,6 cm) de piel tipo D1800 (color blanco) y colocarla sobre la lámina anterior.
- Colocar las láminas del material compuesto prepreg sobre la lámina anterior.
 - Las láminas deben ser apiladas siguiendo las orientaciones deseadas y mostrando especial cuidado en su alineamiento entre ellas.
- Colocar el cordón de fibra de vidrio de ¼ pulgada (0,6 cm) alrededor del material prepreg
 - La misión de este cordón es absorber el exceso de resina que pueda aparecer en el proceso de curado.
- Cortar una lámina de 14 x 14 pulgadas (35,6 x 35,6 cm) de piel tipo D1800 (color blanco) y colocarla sobre el material.
 - La función de esta capa es la de proporcionar el acabado superficial al laminado (textura, rugosidad...)
- Cortar una lámina de 14 x 14 pulgadas (35,6 x 35,6 cm) de film impermeable D5000-0,001 pulgadas (color rojo) y colocarla sobre la lámina anterior.

- Colocar la plancha de aluminio de 11 x 11 pulgadas (28 x 28 cm) y 3/8 pulgada (0,95 cm) de espesor sobre la lámina anterior.
 - Se encarga de proporcionar una presión uniforme sobre el laminado con el fin de evitar arrugas.
- Cortar una lámina de 20 x 21 pulgadas (50,8 x 53,3 cm) de respirador tipo D3000-4 (algodón rugoso) y colocarla sobre la lámina anterior.
 - Se trata de un material muy poroso que permite la extracción del aire del interior de la bolsa, evitando la formación de sellos locales de aire.
- Pegar el sello D413Y alrededor de la plancha de aluminio de 23 x 24 pulgadas (58,4 x 61 cm) sin retirar el papel.
 - Se trata de un potente adhesivo capaz de sellar las fugas de forma autónoma.
- Colocar las tres válvulas de vacío (vacuum valves) D401 sobre la lámina anterior añadiendo bajo cada una de ellas un par de trozos de respirador D3000-4.
- Cortar una lámina de 27 x 47 pulgadas (68,6 x 119,4 cm) de bolsa tipo D316-0,002 pulgadas y pegarla sobre el sello, despegando el papel a medida que se realiza el pegado.
 - Realizar dos pliegues (orejas) a la bolsa para evacuar el aire. Su objetivo es eliminar las arrugas sobre la zona del laminado.
- Comprobar la estanqueidad de la bolsa aplicando vacío a través de una bomba.

En la figura 3.17 se presenta un esquema con el orden de apilamiento de cada uno de los componentes que configuran la bolsa.

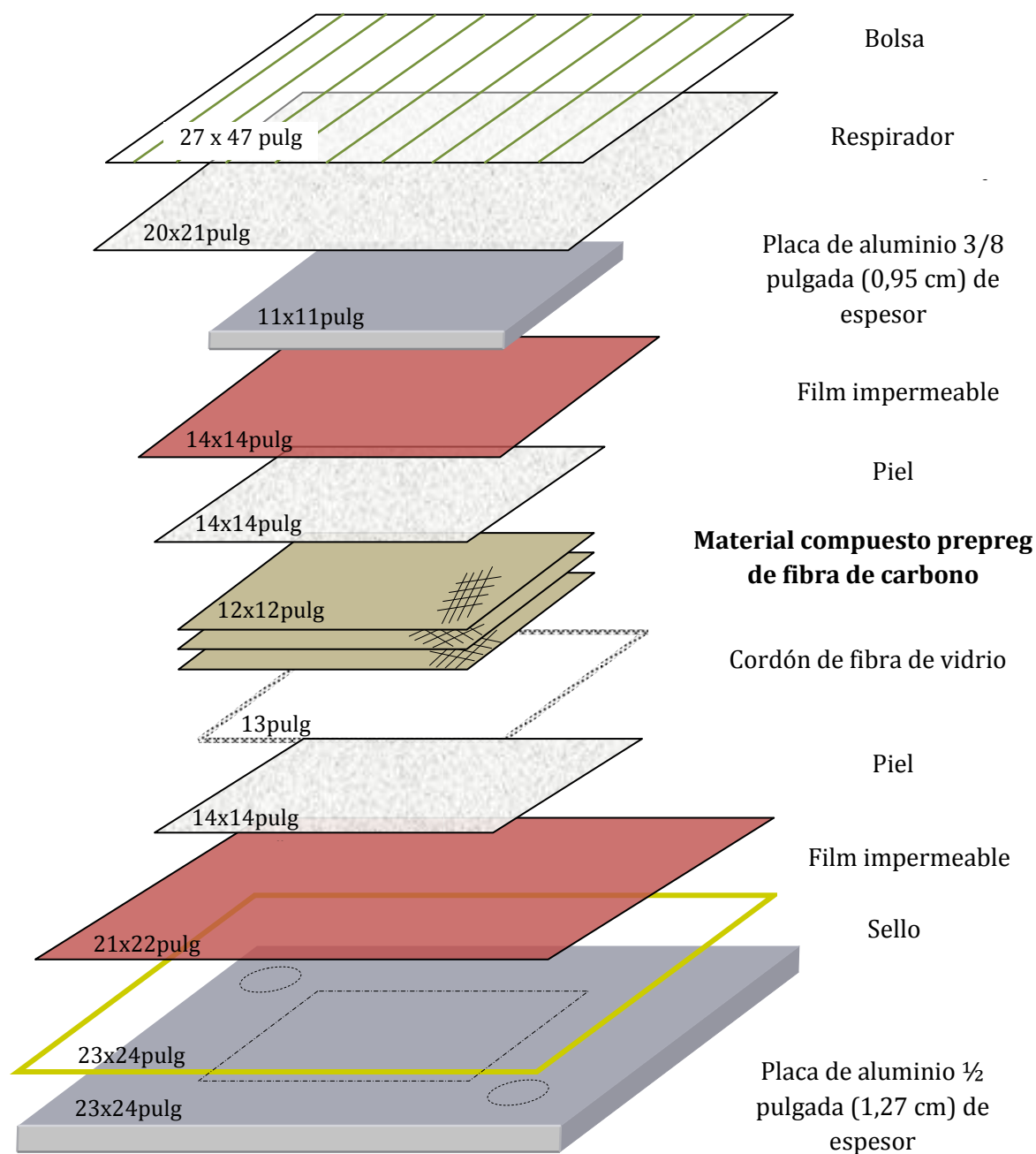


Figura 3.17. Representación de cada uno de los elementos que componen la bolsa de vacío

En la figura 3.18 se muestra una representación en planta de cada uno de los componentes de la bolsa de vacío.

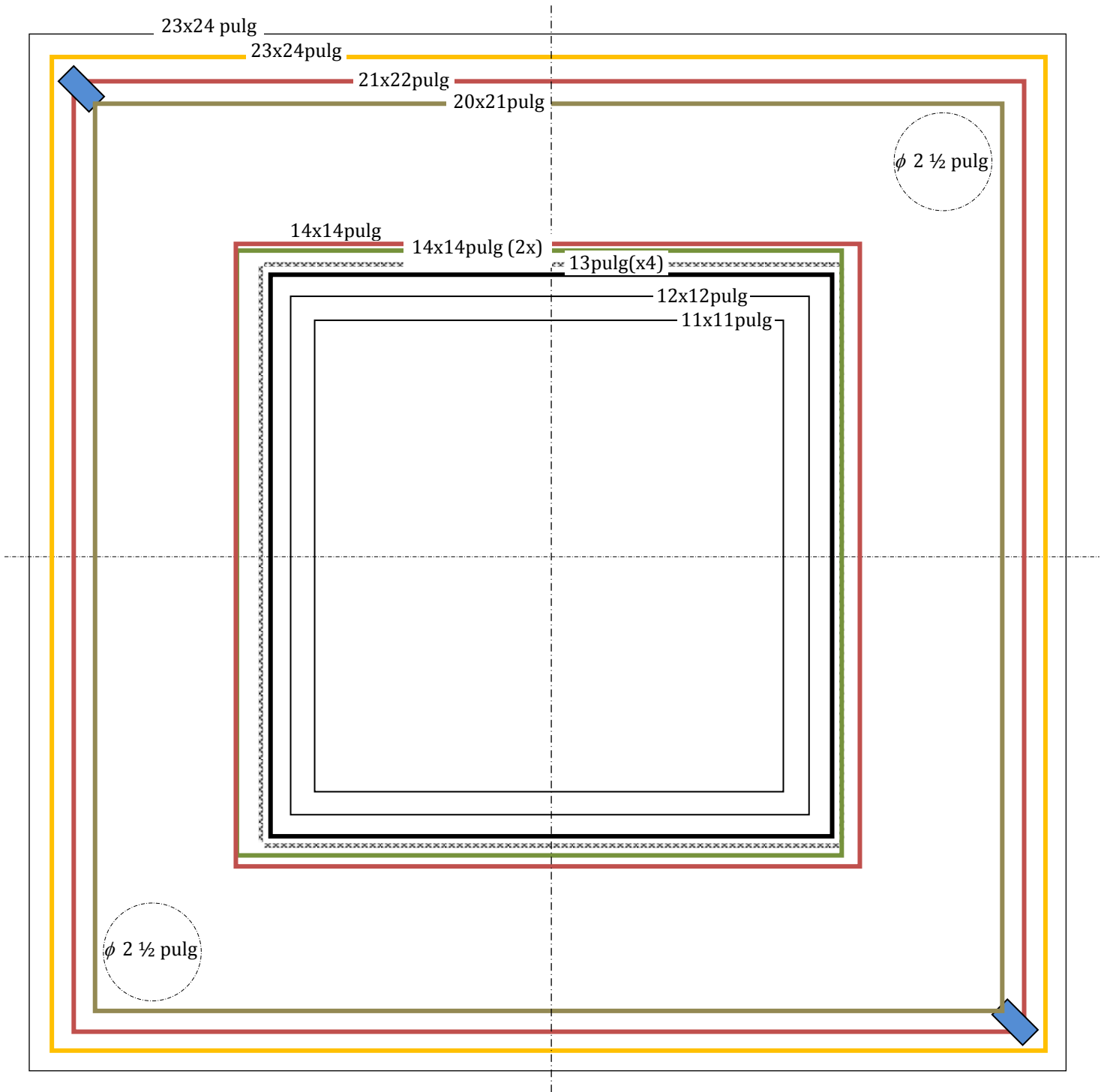


Figura 3.18. Representación en planta de la bolsa de vacío

3.3 Preparación de las muestras

3.3.1 Introducción

Todos los laminados han sido fabricados en planchas de 305 mm x 305 mm (12 x 12 pulgadas). A partir de estas planchas, se han cortado probetas con un ancho de 19 mm (3/4 pulgada) y una longitud de 270 mm (10,6 pulgadas). Estos valores se han elegido siguiendo la recomendación de la norma ASTM D3039 y de diferentes autores. [32, 4]

Los bordes de las probetas han sido pulidos con papel de lija para minimizar el efecto de los defectos en los bordes que aparecen durante el proceso de corte.



Figura 3.19. Probeta después de la colocación de los tabs

Se han pegado tabs de fibra de vidrio/epoxi en los extremos de las muestras, en la zona de agarre de las mordazas de la maquina universal, para evitar la concentración de tensiones en ese área (figura 3.19).

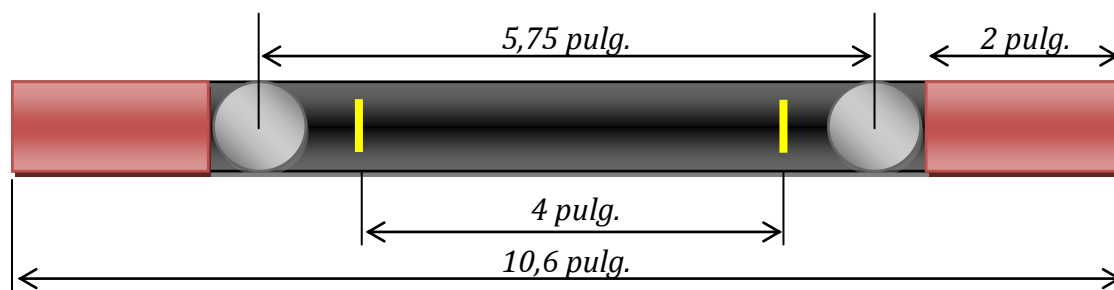


Figura 3.20. Esquema de colocación de los tabs y los micrófonos sobre una probeta

Una longitud de 168 mm (6,6 pulgadas) queda libre entre los tabs para colocar los micrófonos. La distancia entre cada micrófono es de 146 mm (5,75 pulgadas). No obstante, la región de estudio es de 102 mm (4 pulgadas), representada entre dos marcas amarillas en la figura 3.20.

3.3.2 Corte

Para la obtención de las muestras es necesario utilizar una maquina de corte.

Las planchas de material compuesto se fabrican con unas dimensiones de 305 mm x 305 mm (12 x 12 pulgadas), siendo el ancho de cada una de las muestras obtenidas de 19 mm ($\frac{3}{4}$ pulgada), con un largo de 270 mm (10,6 pulgadas). Para realizar el corte de las probetas se ha utilizado una sierra de diamante modelo NORTON Diamond Wheel SD100-R100B99-1/4.

La máquina de corte consta de diferentes partes que ha sido necesario ensamblar para conseguir cortar con precisión cada una de las planchas.

En primer lugar, es de vital importancia la colocación de las planchas en la máquina, ya que una desalineación llevaría a un corte impreciso y a unos resultados erróneos.

Para llevar a cabo este alineamiento, se ha utilizado un sistema formado por una mesa, una mordaza y una regla patrón. Las muestras son alineadas en la mesa de la siguiente forma:

- 1) Se coloca el laminado en la mesa, alineado con la regla patrón, que se encuentra perpendicular al plano de corte del disco.
- 2) Se desliza la plancha hasta la distancia que se quiera cortar.
- 3) Se aprieta la mordaza haciendo uso de una palomilla.
- 4) Se verifica que el disco de corte se encuentra en la posición de inicio.
- 5) Se arranca la máquina.
- 6) Se arranca el equipo de aspiración.
- 7) Mediante una manivela, se controla el movimiento de avance de la mesa (movimiento longitudinal). Este movimiento ha de hacerse de forma continuada y lentamente para asegurar un corte con el mejor acabado posible.
- 8) A medida que se avanza, es necesario pulverizar con agua la zona de corte para facilitar la evacuación de las partículas en suspensión.
- 9) Una vez se llega al final de la carrera, se aparta la pieza obtenida, se detiene el disco y se retrocede la mesa a su punto de partida.

Inspecciones visuales fueron realizadas periódicamente para verificar la ausencia de defectos debidos al proceso de corte tales como deslaminaciones, región de corte con irregularidades, etc.

En las siguientes figuras se muestra la máquina de corte empleada, así como los elementos necesarios para llevar a cabo la alineación del material en la misma (figura 3.21 izquierda) y el disco de corte (figura 3.21 derecha).



Figura 3.21. Máquina de corte: sistema de fijación (izquierda) y disco de corte (derecha)

3.3.3 Colocación de las galgas extensométricas

La colocación de las galgas extensométricas es de vital importancia para la obtención de unos resultados fiables. En la figura 3.22 se presenta el modelo de galga utilizado así como la colocación de la misma sobre una probeta.



Figura 3.22. Modelo de galga extensométrica utilizado (izquierda) y disposición en una de las probetas a ensayar (derecha)

Puesto que se trata de un ensayo de tracción uniaxial, se han empleado galgas de propósito general modelo C2A-06-250LW-350.

Los materiales necesarios para la colocación de las galgas son los siguientes:

- Papel de lija
- Gasas
- Alcohol isopropílico
- Acondicionador [19]
- Neutralizador [20]
- Catalizador
- Pegamento adhesivo [18]
- Cinta adhesiva

Todos estos materiales han sido adquiridos de la compañía Micro-Measurements Vishay [22]

3.3.3.1 Pasos a seguir para la colocación de una galga

Los pasos a seguir para la colocación de una galga extensométrica son los siguientes:

- 1) Limpiar la superficie de la muestra para eliminar la suciedad más gruesa.
- 2) Lijar la superficie hasta obtener una superficie lisa.
- 3) Limpiar la superficie de nuevo con alcohol isopropílico.
- 4) Repetir el paso 3 con una gasa nueva cada vez hasta que la superficie quede completamente limpia.
- 5) Marcar la superficie de la probeta con un rotulador permanente para poder orientar correctamente la galga extensométrica.
- 6) Aplicar el acondicionador.
- 7) Aplicar el neutralizador.
- 8) Retirar la galga de su envoltorio y colocarla sobre una superficie limpia.
- 9) Con cinta especial, colocar la galga extensométrica sobre la muestra intentando conseguir la mejor alineación y centrado en la probeta. Únicamente se pega uno de los extremos de la cinta, dejando libre el extremo opuesto y, por tanto, la superficie de la galga.
- 10) Aplicar el catalizador sobre la superficie de la galga.
- 11) Aplicar una gota de pegamento una vez el catalizador haya secado.
- 12) Inmediatamente después, pegar la galga evitando la formación de burbujas
- 13) Mantener la presión durante 1 minuto aproximadamente.
- 14) Retirar la cinta con cuidado.

Vishay [22] recomienda seguir los siguientes pasos para un correcto pegado de las galgas en la muestra:

Paso1 (figura 3.23) →

- Generalmente se requiere una abrasión preliminar en seco con papel de 320 de tamaño de grano de carburo de silicio, sobre todo si existe óxido en la superficie.
- Eliminar la grasa de la zona en la que se va a pegar la galga mediante el uso de un disolvente, como puede ser el alcohol isopropílico.



Figura 3.23. Representación del paso 1

Paso 2 (figura 3.24) →

- Utilizando un rotulador de tinta permanente se realizan las marcas necesarias en la probeta para conseguir un alineamiento correcto.
- Repetidamente se aplica el acondicionador y se limpia con una gasa hasta que la muestra quede perfectamente limpia.
- Se debe tener especial cuidado para que no quede ninguna sustancia seca en la superficie de la probeta, lo que reduciría las posibilidades de obtener un buen pegado.



Figura 3.24. Representación del paso 2

Paso 3→ (figura 3.25)

- Aplicar una cantidad considerable de neutralizador en una gasa.
- En un solo paso y lentamente aplicarlo sobre la muestra.
- Nunca volver hacia atrás en el movimiento, ya que podría permitir la deposición de sustancias contaminantes.



Figura 3.25. Representación del paso 3

Paso 4 (figura 3.26) →

- Usando unas pinzas se retira la galga de su envoltorio y se coloca sobre una superficie de vidrio químicamente limpia.
- Con la ayuda de cinta adhesiva especial se retira la galga de la superficie de vidrio. Es muy importante levantar la cinta adhesiva manteniendo un ángulo de 45° con la superficie para evitar dañar la resistencia de la galga.

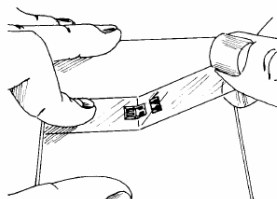


Figura 3.26. Representación del paso 4

Paso 5 (figura 3.27) →

- Posicionar la galga de forma que quede alineada con las marcas realizadas previamente con el rotulador.
- Pegar uno de los lados de la cinta adhesiva sobre la probeta.

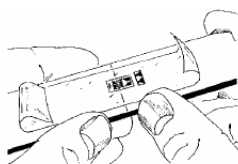


Figura 3.27. Representación del paso 5

Paso 6 (figura 3.28) →

- Levantar la superficie de la cinta adhesiva que no ha sido pegada a la muestra y aplicar el catalizador de forma rápida sobre la superficie de la galga.
- Solamente es necesario aplicar una pequeña cantidad de catalizador y de forma uniforme. Para asegurarse de que el cepillo contiene la cantidad necesaria de catalizador es necesario golpear suavemente el cepillo sobre el cuello de la botella durante 10 veces.

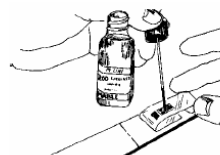


Figura 3.28. Representación del paso 6

Paso 7 (figura 3.29) →

- Una vez el catalizador está seco, aplicar una o dos gotas de pegamento en la unión entre la cinta adhesiva y la superficie de la probeta.
- Esta aplicación del adhesivo debe ser aproximadamente $\frac{1}{2}$ pulgada (1,27 cm) fuera del área de instalación de la galga extensométrica. Esto asegurara que la polimerización local se llevará a cabo cuando el adhesivo entre en contacto con la superficie de la probeta sin causar irregularidades en la galga.

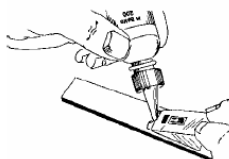


Figura 3.29. Representación del paso 7

Paso 8 (figura 3.30) →

- Ir pegando lentamente la galga a la muestra, manteniendo una presión firme con el dedo pulgar durante al menos 1 minuto para mejorar el pegado.
- En algunas condiciones de temperatura y humedad, la presión debe mantenerse durante algunos minutos.
- Esperar 2 minutos antes de retirar la cinta adhesiva.

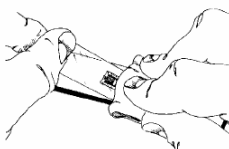


Figura 3.30. Representación del paso 8

Paso 9 (figura 3.31) →

- No es necesario retirar la cinta inmediatamente después de la instalación de la galga.
- Para retirar la cinta, se debe tirar hacia atrás de la misma, separándola continua y lentamente de la superficie.
- Esta técnica evitara el posible levantamiento de la galga.

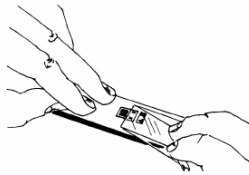


Figura 3.31. Representación del paso 9

El modelo de galga extensométrica empleado incluye las conexiones presoldadas, por lo que no es necesario realizar ningún tipo de soldadura.

3.3.4 Colocación de los micrófonos

Los micrófonos del sistema de adquisición de sonidos se colocan sobre la muestra utilizando un pegamento silicona de tipo RTV Silicone Gasket Maker.

Es muy importante que la superficie de la probeta en la que se van a pegar los micrófonos esté limpia y seca antes de la colocación de los mismos.

Pasadas 24 horas, el pegamento habrá curado completamente.

Tras la realización del ensayo, los micrófonos son despegados para ser pegados en la siguiente muestra a ensayar.

En la figura 3.32 (izquierda) se observa uno de los micrófonos utilizados. La parte blanca es el sensor piezoeléctrico, el cual se adhiere a la probeta por medio de la silicona RTV. El extremo opuesto del cable se conecta a uno de los preamplificadores.

En la figura 3.32 (derecha) se muestra una de las probetas con ambos micrófonos ya colocados.

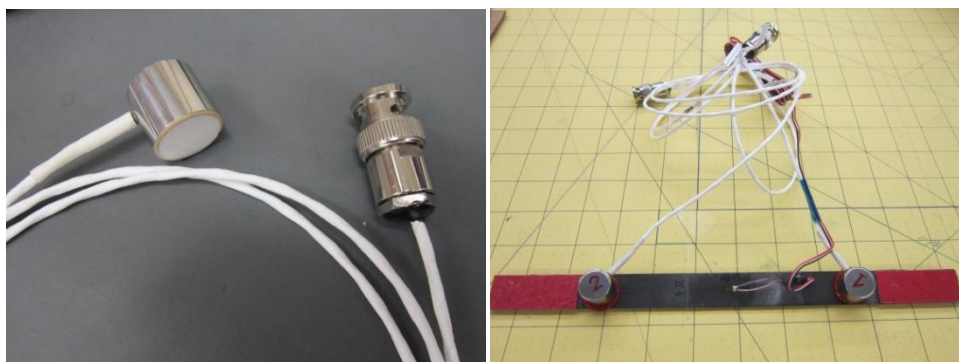


Figura 3.32. Detalle de uno de los sensores de emisiones acústicas (izquierda) y ejemplo de una probeta preparada para ser ensayada (derecha)

3.3.5 Colocación de los tabs

Los tabs utilizados son de fibra de vidrio/epoxi y han sido cortados a partir de una plancha de 305 mm x 305 mm (12 x 12 pulgadas). Se han obtenido tabs de 51 mm (2 pulgadas) de longitud y 19 mm (3/4 pulgada) de ancho.

Como se mencionó anteriormente, los tabs tienen la función de minimizar las concentraciones de tensión creadas por las mordazas de la Máquina Universal de Ensayos.

Los tabs se han pegado a la muestra utilizando una resina epoxi convencional. Una vez aplicado el adhesivo, se introducen en el horno a baja temperatura para mejorar el curado de la resina.

3.4 Máquina Universal de Ensayos

3.4.1 Elementos y descripción

Se ha utilizado una máquina de ensayos servo-hidráulica modelo MTS 810 (figura 3.33) con una capacidad de carga máxima de 100kN (22000 libras) [23]. Se han realizado ensayos de tracción uniaxial, a temperatura ambiente, con control de desplazamiento a una velocidad de 0,005 in/min (0,127 mm/min). [11]

Inicialmente se realizaron ensayos con una velocidad de desplazamiento 10 veces mayor, es decir, de 0,05 in/min pero se comprobó que esta velocidad era demasiado elevada.

La máquina consta de dos mordazas hidráulicas modelo 647 Hydraulic Wedge Grip.

El controlador es un modelo Flex Test SE y el software empleado en el ordenador es de tipo MultiPurpose TestWare.



Figura 3.33. Máquina Universal de Ensayos utilizada

Se ha utilizado un acondicionador de señal modelo 2100 System de Micro-Measurements Vishay.

3.5 Máquina de Rayos-X

3.5.1 Descripción

La máquina de rayos-X utilizada es un modelo Faxitron 43855A (figura 3.34). [30]



Figura 3.34. Máquina de rayos-X Faxitron 43855A

En primer lugar, es necesario realizar una verificación de la máquina antes de ponerla en funcionamiento. Esta verificación se realiza para asegurar la estanqueidad de la misma y comprobar la inexistencia de fugas de radiación hacia el exterior.

Los diferentes elementos de los que consta el panel de control se describen a continuación, con la ayuda de la figura 3.35.

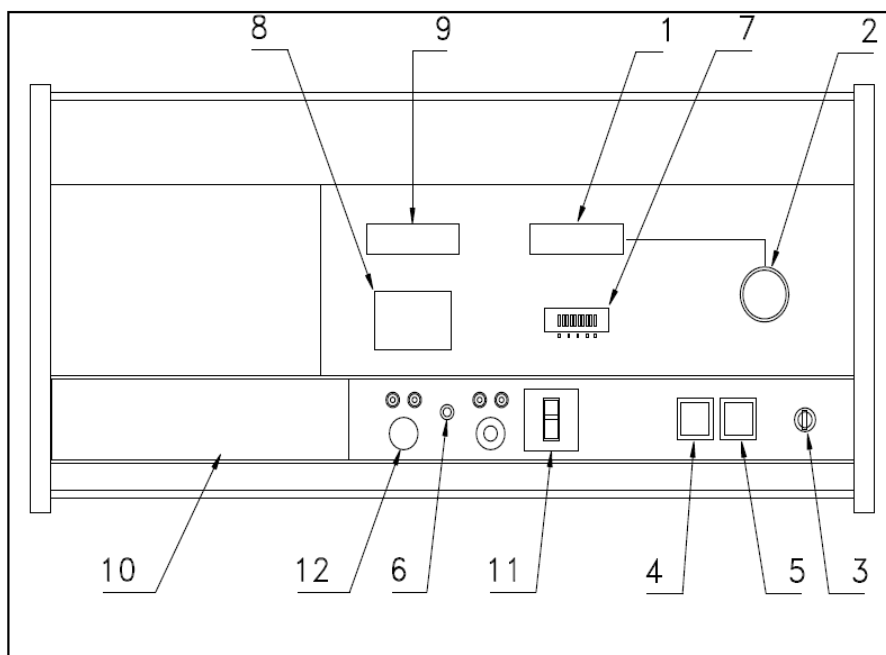


Figura 3.35. Panel de control de la máquina de rayos-X Faxitron 43855A

- 1) Medidor de kVp
- 2) Controlador de kVp
- 3) Interruptor con llave de seguridad
- 4) Interruptor de START de los rayos-X
- 5) Interruptor de STOP de los rayos-X
- 6) Indicador de exceso de temperatura
- 7) Medidor de la corriente a través del tubo
- 8) Rueda de establecimiento de tiempo
- 9) Visualizador digital de tiempo
- 10) Cubierta deslizante
- 11) Interruptor automático de encendido-apagado
- 12) Ajuste de mA

Es necesario seguir rigurosamente los pasos recomendados por el fabricante cada vez que se va a utilizar la máquina. Estos pasos se detallan a continuación:

- Verificar que la puerta de la cabina está cerrada
- Introducir la llave en el interruptor y girar hasta la posición ON

- Girar el controlador de KVp y verificar que el medidor de corriente a través del tubo está a cero.
- Colocar la muestra y el film a utilizar en la posición adecuada.
- Cerrar la puerta de la cabina completamente.
- Ajustar el controlador de kVp hasta el valor deseado, en este caso, 30 kVp.
- Girar la rueda de establecimiento de tiempo hasta alcanzar el tiempo de exposición deseado. En este caso, este tiempo será de 2 minutos o de 2 minutos y 20 segundos dependiendo del espesor de la probeta.
- Presionar el interruptor START y comprobar que el medidor de corriente indica que la exposición se está llevando a cabo. El visualizador digital de tiempo indicará el mismo número que se ha seleccionado con la rueda.
- A partir de este momento, comenzará la cuenta atrás, segundo a segundo, hasta alcanzar el cero.
- Cuando esto ocurra, el visualizador se apagará, al igual que el interruptor de START y el medidor de corriente, y la exposición habrá terminado.
- Girar el controlador de kVp nuevamente hasta el valor de cero.
- Abrir la puerta de la cabina y sacar la muestra y el soporte con el film.
- Cerrar la puerta de nuevo y mantenerla cerrada hasta la próxima exposición.

Se debe asegurar que las fugas de radiación están por debajo de 0,5 mR/hr a 5 cm de cualquier superficie externa.

Además, esta máquina consta de una protección interna de plomo que reduce la radiación hacia el exterior. No obstante se deben seguir los siguientes cinco pasos para minimizar el riesgo de radiación, que puede perjudicar a las personas que están realizando la manipulación.

- a) Girar el control de kVp a cero inmediatamente después de cada exposición y dejarlo a cero entre exposiciones.
- b) Mantener la puerta de la cabina cerrada en todo momento, excepto para la introducción de las muestras.
- c) Desconectar la máquina de la red si no se va a utilizar durante un largo periodo de tiempo.
- d) Asegurar que todas las luces de la máquina están apagadas cuando termina cada exposición.
- e) Realizar una comprobación semestral utilizando instrumentos calibrados para asegurar el correcto funcionamiento de la máquina.

3.5.2 Procedimiento

Para poder llevar a cabo las radiografías de las probetas fisuradas, es necesario impregnar los bordes de éstas con un líquido penetrante de contraste. De esta forma, al realizar las radiografías, será posible visualizar las fisuras transversales, ya que el líquido habrá penetrado por capilaridad a través de ellas (sección 3.5.2.2).

Tras la aplicación del líquido penetrante, se procede a la exposición de la probeta en el interior de la máquina de rayos-X y a su posterior revelado (sección 3.5.2.3).

3.5.2.1 Preparación del líquido penetrante

Se ha preparado una mezcla con diferentes sustancias para conseguir un líquido revelador capaz de penetrar por capilaridad en el interior de las fisuras de las muestras. Es muy importante que la mezcla se realice con las proporciones adecuadas para conseguir la mejor calidad y obtener los mejores resultados.

La mezcla consta de:

ZnI ₂ pulverizado [21]	-----60 g
Agua----	-----8 ml
Alcohol isopropílico-----	-----10 ml
Kodak Photo-Flo 200 -----	-----3 ml

Con el uso de una pipeta se miden las cantidades necesarias para realizar la mezcla, teniendo especial cuidado a la hora de tratar con el Yoduro de Zinc (ZnI₂) debido a su alta corrosividad.

3.5.2.2 Aplicación del líquido sobre la muestra

Una vez la mezcla está terminada, puede ser aplicada en las muestras.

- Con la ayuda de un pincel, se extienden pequeñas cantidades de líquido a lo largo de uno de los bordes de la probeta.
- Se debe esperar unos minutos para dar tiempo al líquido a penetrar por capilaridad en el interior de las fisuras generadas.

- Una vez se ha impregnado uno de los lados, se gira la muestra para impregnar el lado opuesto.
- Cuando el líquido ha penetrado en el interior de la muestra, es necesario limpiar la superficie de la misma para no obtener datos incoherentes a la hora de realizar la radiografía.
- Por último, se introduce la muestra dentro de la máquina de rayos-X y se realiza la radiografía.

3.5.2.3 Exposición y revelado de la radiografía

El tiempo de exposición de las muestras en el interior de la maquina así como el tiempo de revelado de las radiografías, son de vital importancia para la obtención de resultados precisos.

En función del film utilizado, el tiempo de exposición y de revelado varían de forma considerable.

El film utilizado para realizar las radiografías es de tipo Fujifilm FP-100C45 4 x 5 pulgadas (10,2 x 12,7 cm) Professional Instant Color film (figura 3.36).

Este film tiene unos tiempos de revelado dependientes de la temperatura a la que se encuentre la radiografía. En este caso, se ha mantenido un tiempo de revelado de 90 segundos, dado que la temperatura del laboratorio era de unos 22°C.

Se han realizado numerosas pruebas antes de conseguir el tiempo de exposición más adecuado para obtener los mejores resultados.

Tiempos de exposición demasiado largos llevan a radiografías demasiado claras mientras que con tiempos de exposición muy cortos se obtienen radiografías muy oscuras.

Las probetas del laminado A y del laminado B contienen 10 y 14 láminas respectivamente, es decir, un espesor de 1,4 mm y 1,96 mm. Estas muestras fueron sometidas a una exposición de 2 minutos.

Las probetas del laminado C y del laminado D contienen 19 láminas, es decir, un espesor de 2,66 mm. Estas muestras, al tener un espesor mayor, fueron sometidas a una exposición de 2 minutos y 20 segundos.



Figura 3.36. Film fotográfico utilizado

En la figura 3.37 se muestra, a modo de ejemplo, una de las radiografías conseguidas tras el ensayo de una probeta del laminado A.

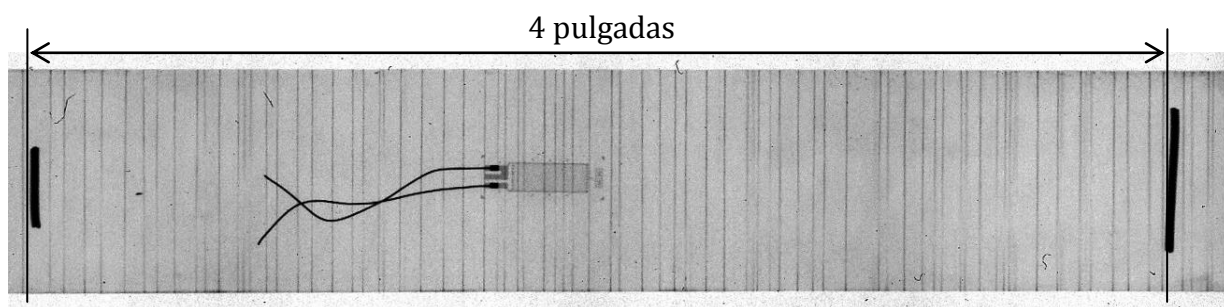


Figura 3.37. Ejemplo de radiografía obtenida del laminado A

Se ha utilizado un soporte (holder) en el interior del cual se coloca el film (figura 3.38). Cada vez que se realiza una radiografía, se introduce un nuevo film en el interior de un cartucho dentro del soporte, haciendo que la pestaña del film sobresalga hacia el exterior a través de los rodillos de revelado. Por último se cierra el soporte. Este proceso se debe realizar en un ambiente con luz tenue.

Para realizar la radiografía es necesario extraer la placa metálica del soporte. A continuación el soporte es colocado en el interior de la máquina de rayos X, con la superficie lisa hacia arriba. Sobre esta superficie, se coloca la muestra a radiografiar.

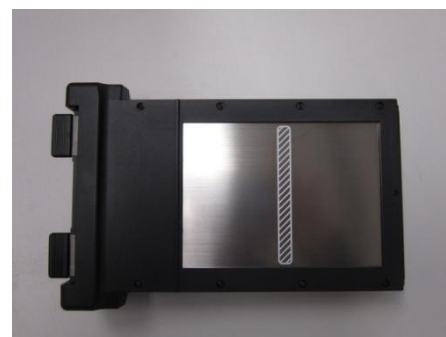


Figura 3.38. Soporte para colocar el film fotográfico

El conjunto es expuesto a los rayos-X durante el tiempo considerado (2 min – 2 min 20 s). Tras esto, se extrae el soporte de la máquina de rayos-X y a continuación se retira el film del soporte tirando de la pestaña de forma continuada.

El tiempo de revelado recomendado depende de la temperatura ambiente y del tipo de film. En este caso, el tiempo de revelado empleado es de 90 segundos. Es entonces cuando se puede despegar la piel del film. Las radiografías deben dejarse secar durante varios minutos.

3.6 Sistema de Emisiones Acústicas

3.6.1 Descripción del sistema y sus aplicaciones

El Sistema de Emisiones Acústicas (AE) es un potente instrumento para examinar el comportamiento de los materiales cuando se deforman bajo la aplicación de carga.

Este sistema se puede definir como una onda elástica transitoria generada por la rápida liberación de energía dentro de un material (figura 3.39).

AE es capaz de detectar el sonido de las fisuras creciendo, de las fibras rompiéndose y de muchos otros modos de daño activo en materiales sometidos a una tensión.

Es posible detectar daño a pequeña escala durante un tiempo antes del fallo, por lo que este sistema puede ser utilizado como técnica no destructiva para encontrar defectos en los materiales.

Algunas de las principales aplicaciones del Sistema de Emisiones Acústicas son:

- Propagación de fisuras
- Fatiga
- Corrosión
- Deslizamiento fibra-matriz
- Rotura de fibras
- Deslaminación

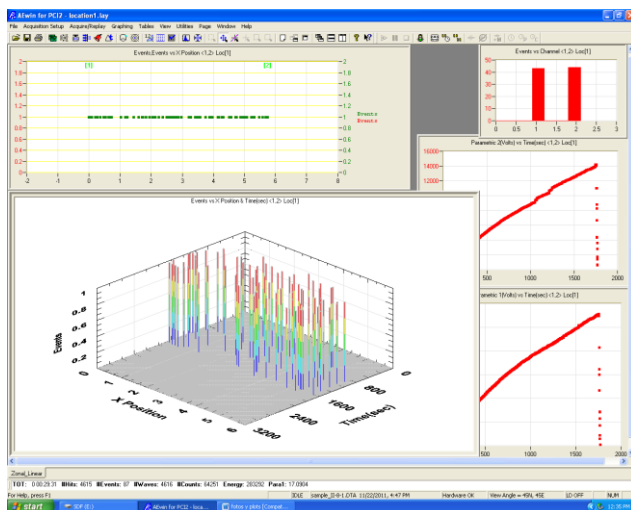


Figura 3.39. Sistema de Emisiones Acústicas (AE)

El Sistema de AE está compuesto por [25]:

- Una tarjeta de adquisición y procesamiento de emisiones acústicas.
 - Mistras PCI-2 (18 bit AE), con un ancho de banda de 1kHz-3MHz.
- Dos canales para la recepción de emisiones acústicas, cada uno compuesto por un sensor o micrófono y una etapa de preamplificación. Se trata de dos micrófonos WD S/N FR 05 y 06 y de dos preamplificadores de voltaje 2/4/6. (Figura 3.40)

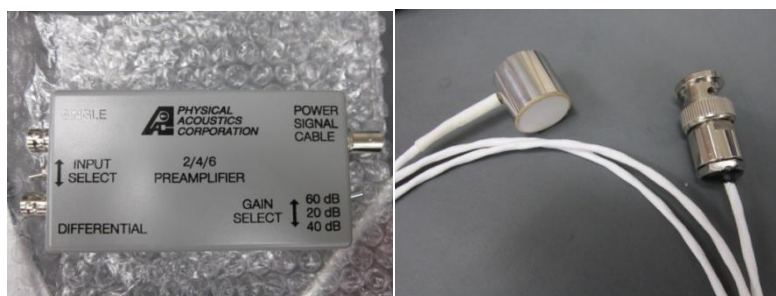


Figura 3.40. Preamplificador y sensor acústico

- Un programa informático para el registro y tratamiento de las señales acústicas. El programa es AEwin PCI-2.

Para todas las muestras ensayadas, los receptores se han colocado a una distancia de 5,75 pulgadas (14,6 cm). No obstante, la región de estudio tiene una longitud de 4 pulgadas (10,2 cm). Esta región se ha acotado mediante dos marcas que son visibles en las radiografías (figura 3.41).



Figura 3.41. Probeta con los sensores acústicos

Las ventajas que presenta estudiar una región que no incluya las fronteras son fundamentalmente tres:

- Los eventos externos son descartados, por lo que no es necesario filtrarlos.
- Se minimizan imprecisiones asociadas a la proximidad de los receptores acústicos.
- La longitud máxima que permiten las radiografías utilizadas es de 4 pulgadas (10,2 cm), por lo que ésta es la limitación determinante.

El hecho de reducir la región de estudio no supone ninguna imprecisión notable en los resultados finales, ya que el parámetro que se pretende medir es la densidad de fisuras ($\lambda = [\text{número de fisuras/mm}]$).

3.6.2 Parámetros básicos

En este apartado se van a describir las características básicas que definen una onda acústica en un sistema de Emisiones Acústicas. En la figura 3.42 se representan algunas de estas características.

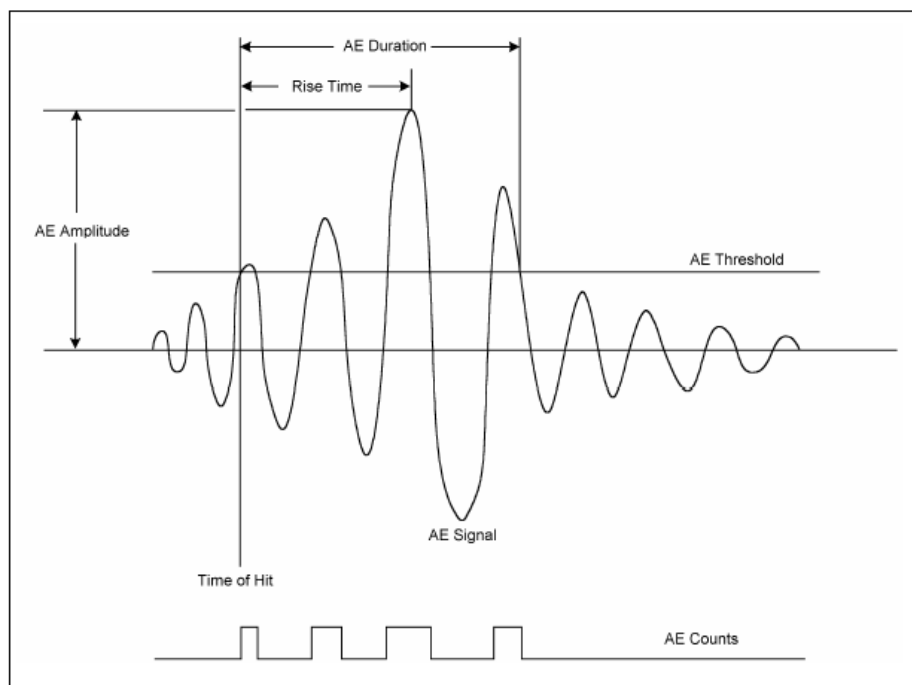


Figura 3.42. Características básicas que definen una onda acústica

Emisión acústica: ondas elásticas generadas por la rápida liberación de energía proveniente del interior de un material.

Evento: alteración local en un material que provoca una emisión acústica.

Pulso de AE: proceso de detección y medida de una señal de emisiones acústicas.

Energía: parámetro de la onda obtenido al integrar la señal de tensión rectificada durante la duración del pulso de AE.

Amplitud: la amplitud del sistema de Emisiones Acústicas es el máximo valor de la señal de tensión en valor absoluto durante un pulso de AE.

Tiempo de crecimiento: tiempo entre el comienzo del pulso de AE y el pico de amplitud del mismo.

Duración: tiempo desde que el primer pulso de AE supera el valor umbral hasta que deja de superar dicho umbral.

Contador: esta característica cuenta el número de pulsos de una emisión acústica sobre el umbral de AE.

Centroide de frecuencia: característica en tiempo real derivada de la frecuencia.

Frecuencia de pico: se define como la frecuencia a la cual ocurre el pico de amplitud.

Frecuencia media: es calculada como el número de pulsos de AE dividido por la duración.

Umbral de AE: recoge el valor del umbral de amplitud en el tiempo de un pulso de AE. Por defecto, este valor es de 45 dB.

En la tabla 3.5 se muestra la resolución, el rango y las unidades de cada una de las características de una señal acústica.

Características de la señal	Resolución	Unidades	Rango
Energía	1 unidad	10 $\mu\text{V}\cdot\text{s}/\text{unidad}$	0 - 65535
Señal de fuerza	1 unidad	3,05 $\text{pV}\cdot\text{s}$	0 – 1,31x10 ⁸ $\text{pV}\cdot\text{s}$
Energía absoluta	1 unidad	9,31 x 10 ⁻²² J	2,61 x 10 ⁻⁸ J
Amplitud	1 dB	1 dB	10 - 100 dB
Tiempo de crecimiento	1 μs	μs	0 – 65,5 ms
Duración	1 μs	μs	0 - 1000 ms
Contador	1 unidad	Unidad	0 - 65535 unidades
Centroide de frecuencia	1 kHz	kHz	1 – 2100 kHz
Frecuencia de pico	1 kHz	kHz	1 – 2100 kHz
Frecuencia media	1 kHz	kHz	0 - 65535
AE umbral	1 dB	1 dB	14 - 99 dB

Tabla 3.5. Resumen de las características básicas de una onda acústica: resolución, unidades y rango

3.6.3 Teoría de localización

El Sistema de Emisiones Acústicas, con dos receptores, permite establecer la ubicación en la que se produce un evento.

Se define evento como una alteración a nivel local dentro de un material, que da lugar a una emisión acústica. Una emisión acústica es una onda elástica generada por la liberación de energía en el interior de un material.

Las hipótesis aceptadas para la implementación del sistema de localización son las siguientes:

- Se considera que el elemento estudiado es unidimensional. Las probetas ensayadas tienen unas dimensiones de 10,5 x 0,75 pulgadas (26,7 cm x 1,9 cm).

$$\frac{L}{W} > 10; L \gg t \quad (3.1)$$

Además, los eventos que se han caracterizado son fisuras que se propagan a lo largo de toda la anchura de la muestra.

- La velocidad de propagación de las ondas acústicas en las probetas es uniforme y constante a lo largo de todo el ensayo. Las ondas se propagan a lo largo del laminado a través de las láminas no fisuradas, como se ha comprobado experimentalmente.

En base a estas hipótesis, se demuestra que partiendo del desfase temporal entre los dos micrófonos receptores, se puede establecer la localización de cualquier evento (a excepción de aquellos eventos que no se produzcan entre los dos micrófonos).

En la figura 3.43 se representa un esquema de los dos receptores encargados de recibir la onda acústica generada en el punto x_0 .

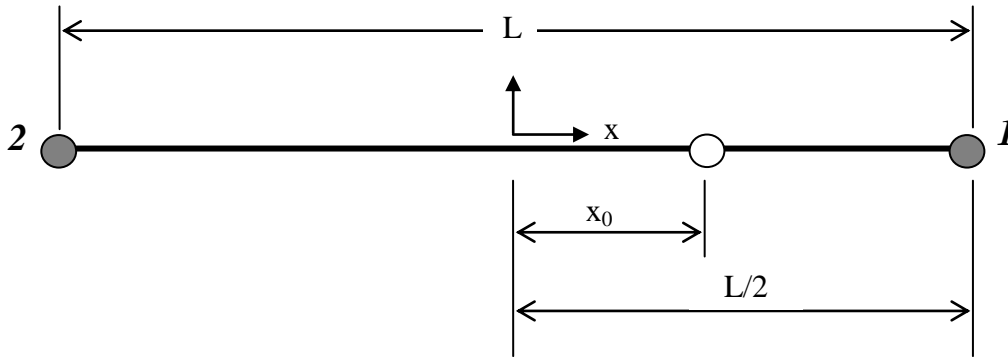


Figura 3.43. Representación del sistema material-emisión acústica-sensores acústicos

A continuación se muestran las ecuaciones que gobiernan la teoría de la localización:

$$t_1 = \frac{\frac{L}{2} - x_0}{v} \quad (3.2)$$

$$t_2 = \frac{\frac{L}{2} + x_0}{v} \quad (3.3)$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2x_0}{v} \rightarrow x_0 = \frac{v\Delta t}{2} \quad (3.4)$$

siendo

v : velocidad de propagación de ondas

t_1 : tiempo hasta el receptor 1

t_2 : tiempo hasta el receptor 2

Δt : intervalo temporal (desfase) medido por AE-DAS

Si un evento ocurre fuera de la región comprendida entre los dos micrófonos, el sistema no es capaz de determinar la localización de dicho evento. Esto se debe a que el desfase tiene un valor constante para todos estos eventos, de valor $\Delta t_e = \frac{L}{v}$. Estos eventos serán denominados eventos externos.

3.6.4 Configuración del sistema de adquisición de datos de AE

3.6.4.1 Cálculo de la velocidad

Para cada una de las probetas, previamente al ensayo de tracción, se ha determinado experimentalmente la velocidad de propagación de las ondas acústicas a través de las mismas (figura 3.44).

El procedimiento seguido se basa en la obtención del desfase temporal que aparece cuando ocurre un evento externo (Δt_e). Una vez se ha registrado este desfase y conociendo la distancia entre ambos sensores acústicos (L), la velocidad de las ondas se calcula como:

$$v = \frac{L}{\Delta t_e} \quad (3.5)$$

La reproducibilidad de estos eventos externos ha sido validada siguiendo la norma ASTM E976. La representación de estos eventos externos se ha llevado a cabo rompiendo minas de grafito de 0,5 mm de diámetro sobre la superficie de la probeta. [14]

Estudios anteriores realizados con laminados de materiales compuestos de tipo sándwich utilizan velocidades de onda de 4347 m/s (171220 in/s) en dirección longitudinal. [29]

La velocidad de las ondas acústicas introducida en el programa se calcula como la media aritmética entre diez medidas experimentales (cinco en cada extremo de la muestra).

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Laminado A: $[0/90_8/0]$

- Probeta 1 $\rightarrow 182240$ in/s
- Probeta 2 $\rightarrow 178640$ in/s
- Probeta 3 $\rightarrow 174290$ in/s

Laminado B: $[+25/-25/90_{10}/-25/+25]$

- Probeta 1 $\rightarrow 178100$ in/s
- Probeta 2 $\rightarrow 177800$ in/s
- Probeta 3 $\rightarrow 172670$ in/s

Laminado C: $[0/+55_4/-55_4/0/-55_4/+55_4/0]$

- Probeta 1 $\rightarrow 171460$ in/s
- Probeta 2 $\rightarrow 170020$ in/s
- Probeta 3 $\rightarrow 174710$ in/s

Laminado D: $[0/+70_4/-70_4/0/-70_4/+70_4/0]$

- Probeta 1 $\rightarrow 170820$ in/s
- Probeta 2 $\rightarrow 171680$ in/s
- Probeta 3 $\rightarrow 167940$ in/s

En la figura 3.44 se presenta una imagen de uno de los ensayos para determinar la velocidad de propagación de las emisiones acústicas en una probeta. En la parte superior izquierda se muestra la localización de los eventos registrados mientras que en la gráfica tridimensional de la parte inferior se muestra la cantidad de eventos registrados en función de la posición y del tiempo.

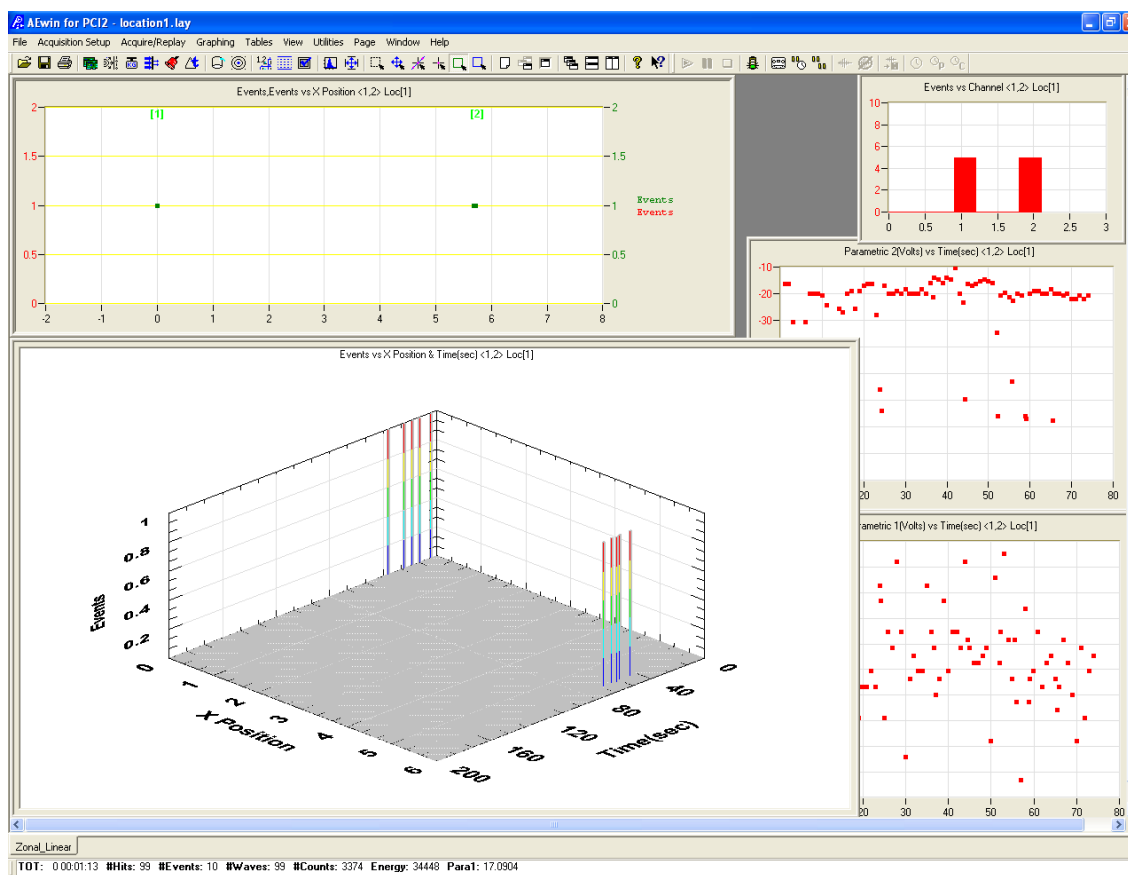


Figura 3.44. Ensayo para la determinación de la velocidad de las emisiones acústicas en la probeta

3.6.4.2 Entradas analógicas: fuerza y deformación

Para poder sincronizar adecuadamente el valor de la deformación longitudinal en la muestra, la fuerza aplicada y la aparición de fisuras, el sistema de Emisiones Acústicas recibe como entradas analógicas los valores de deformación y de carga aplicada.

La señal de carga aplicada (entrada paramétrica 1) es enviada por el controlador MTS a través de una conexión BNC. La relación de conversión es de 2000 Lbf/V. Se trata de una entrada diferencial de +/- 10V.

La señal de deformación (entrada paramétrica 2) procede del acondicionador de señal a través de una conexión BNC. La relación de conversión es de 2000 $\mu\epsilon$ /V. Se trata de una entrada diferencial de +/- 10V.

El nivel de preamplificación se ha fijado en 40 dB.

3.7 Esquema del sistema completo

El objetivo del sistema diseñado es poder registrar, en el mismo ordenador, las señales del sistema de emisiones acústicas, la deformación longitudinal y la fuerza, de forma que estén sincronizadas.

Se dispone de dos ordenadores. En uno de ellos se ejecuta el control de la máquina universal de ensayos y en el otro se controla la adquisición de datos del sistema AE.

Se tomó la decisión de recoger las señales de fuerza y deformación en ambos ordenadores. De esta forma, el ordenador que controla el sistema AE dispone de toda la información necesaria y el ordenador que controla la máquina de ensayos recoge únicamente las señales de fuerza y deformación.

A continuación se detalla cómo se han acoplado los sistemas de captura de datos:

- **Micrófonos o sensores:** cada uno de los micrófonos se conecta a su respectivo preamplificador y éste a su vez se conecta a la tarjeta de adquisición de datos del equipo de emisiones acústicas, que se encuentra en la CPU 1 (figura 3.35) a través de un conector BNC.
- **Célula de carga:** ubicada sobre la mordaza superior de la máquina MTS, mide la fuerza aplicada sobre la muestra. Esta señal es enviada al controlador MTS y a su vez es dirigida a la CPU 2 (figura 3.35), donde se encuentra instalado el SW MPT. La señal de fuerza también es enviada desde el controlador MTS hasta la CPU 1, en la que entra como una entrada analógica (entrada analógica 1).
- **Deformación:** se obtiene de una galga extensométrica colocada sobre la probeta. Dicha galga está conectada a un acondicionador de señal, el cual envía la señal de deformación ya tratada a la CPU 1 como una entrada analógica (entrada analógica 2) y al controlador MTS, donde es recibida por el SW MPT.

En la figura 3.45 se muestra el sistema completo, formado por la Máquina Universal de Ensayos, el Sistema de Emisiones Acústicas y el acondicionador de señal.



Figura 3.45. Disposición del sistema completo en el laboratorio

En la figura 3.46 se muestra un esquema del sistema completo:

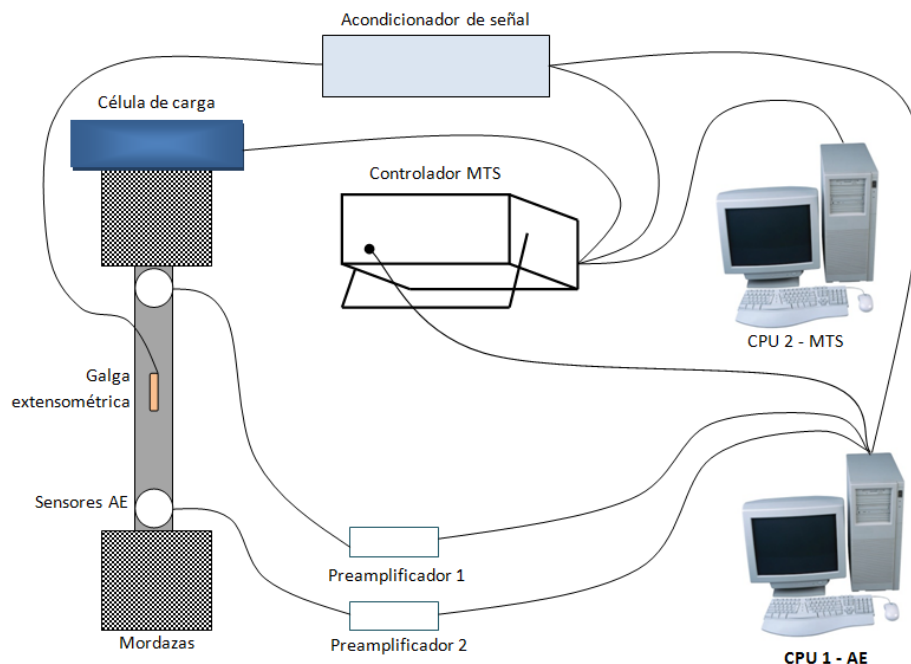


Figura 3.46. Esquema de conexiones del sistema completo

Capítulo 4

Resultados Experimentales

Como ya se dijo con anterioridad, los resultados obtenidos pretenden demostrar la validez de un sistema de Emisiones Acústicas para la detección de fisuras intralaminares en laminados de material compuesto durante su proceso de carga.

Como se abordó en el capítulo 2, las fisuras pueden producirse en modo I, en modo II o en modo mixto. El modo de aparición de una fisura en un laminado sometido a carga uniaxial depende de la configuración del laminado, es decir, de la orientación de sus láminas.

En este capítulo, se han analizado dos configuraciones en las que predomina el modo I de fractura (laminados A y B) y otras dos configuraciones en las que aparece también el modo II de fractura (laminados C y D).

La densidad de fisuras se determina como el número de fisuras por unidad de longitud, siendo esta longitud la distancia entre las marcas que acotan la región de estudio, es decir, 4 pulgadas (10,2 cm).

$$\lambda = \frac{n}{L} = \frac{n}{4 * 25,4} \left(\frac{\text{fisuras}}{\text{mm}} \right) \quad (4.1)$$

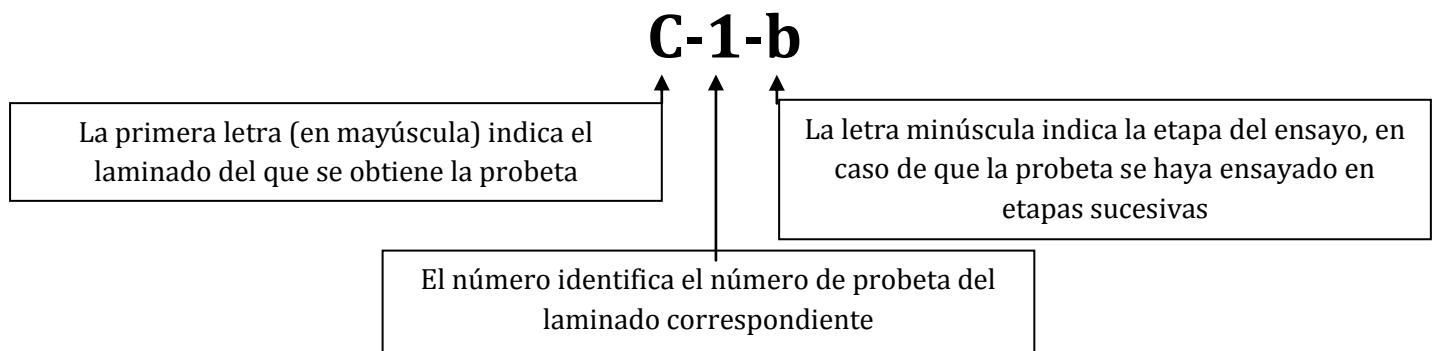
Los ensayos para la validación del sistema de Emisiones Acústicas (Acoustic Emission, AE) se han realizado en tres etapas de carga (etapa a, etapa b y etapa c). Tras cada una de las etapas se ha tomado una radiografía de la muestra y se ha contabilizado el número de nuevas fisuras aparecidas (n_a^{Xray} , n_b^{Xray} y n_c^{Xray}). Sin embargo, en cada etapa el sistema AE registra un número de eventos (n_a^{AE} , n_b^{AE} y n_c^{AE}) superior al número de nuevas fisuras formadas.

Por lo tanto, el objetivo es identificar las propiedades físicas que permiten diferenciar la formación de una fisura de otros eventos para así poder descartar el resto de eventos asociados a otros fenómenos, tales como deslaminaciones, ruido exterior procedente de vibraciones, deslizamiento fibra-matriz, rotura de fibras, etc.

El procedimiento seguido ha sido el siguiente:

- 1) En primer lugar se identifican las fisuras formadas con los eventos registrados por AE en cada etapa de deformación. El parámetro a través del cual se verifica dicha asociación es la ubicación de cada fisura calculada por AE.
- 2) En segundo lugar es necesario aislar cualitativamente las características propias de la emisión acústica generada en la formación de una fisura: amplitud, energía, duración, tiempo de crecimiento, contador, frecuencia media, centroide de frecuencia y frecuencia de pico.
- 3) Las dos fases anteriores son repetidas en cada una de las etapas de deformación.
- 4) Finalmente, y en base a los datos observados, se establece un criterio capaz de satisfacer con la mayor precisión las correspondencias entre eventos y fisuras en todo el ensayo.

La nomenclatura seguida en el informe para los ensayos y las probetas es la siguiente:



4.1 Laminados en los que domina el modo I de fractura

Dentro de esta sección se han ensayado dos configuraciones de laminado diferentes.

La primera configuración es un laminado cruzado (formado por láminas orientadas a 0° y a 90°) con la siguiente secuencia de apilamiento:

Laminado A: $[0/90_4]_S \rightarrow [0/90_8/0]$

Se trata de un laminado simétrico formado por 10 láminas. Las dos láminas exteriores están orientadas a lo largo de la dirección de carga y las ocho láminas interiores están orientadas de forma perpendicular a dicha dirección.

La segunda configuración es un laminado equilibrado (existen tantas láminas orientadas a $+\theta$ como a $-\theta$) con la siguiente secuencia de apilamiento:

Laminado B: $[\pm 25/90_5]_S \rightarrow [+25/-25/90_{10}/-25/+25]$

Se trata de un laminado simétrico formado por 14 láminas. Las dos parejas de láminas exteriores están orientadas a $\pm 25^\circ$ respecto a la dirección de carga y las 10 láminas interiores están orientadas de forma perpendicular a dicha dirección.

4.1.1 Validación y filtrado de las emisiones acústicas: laminado A

La muestra ensayada para la validación y el filtrado de las emisiones acústicas del laminado A ha sido la probeta A-1.

En el siguiente gráfico (figura 4.1) se presentan los resultados observados a través de las radiografías obtenidas tras cada etapa.

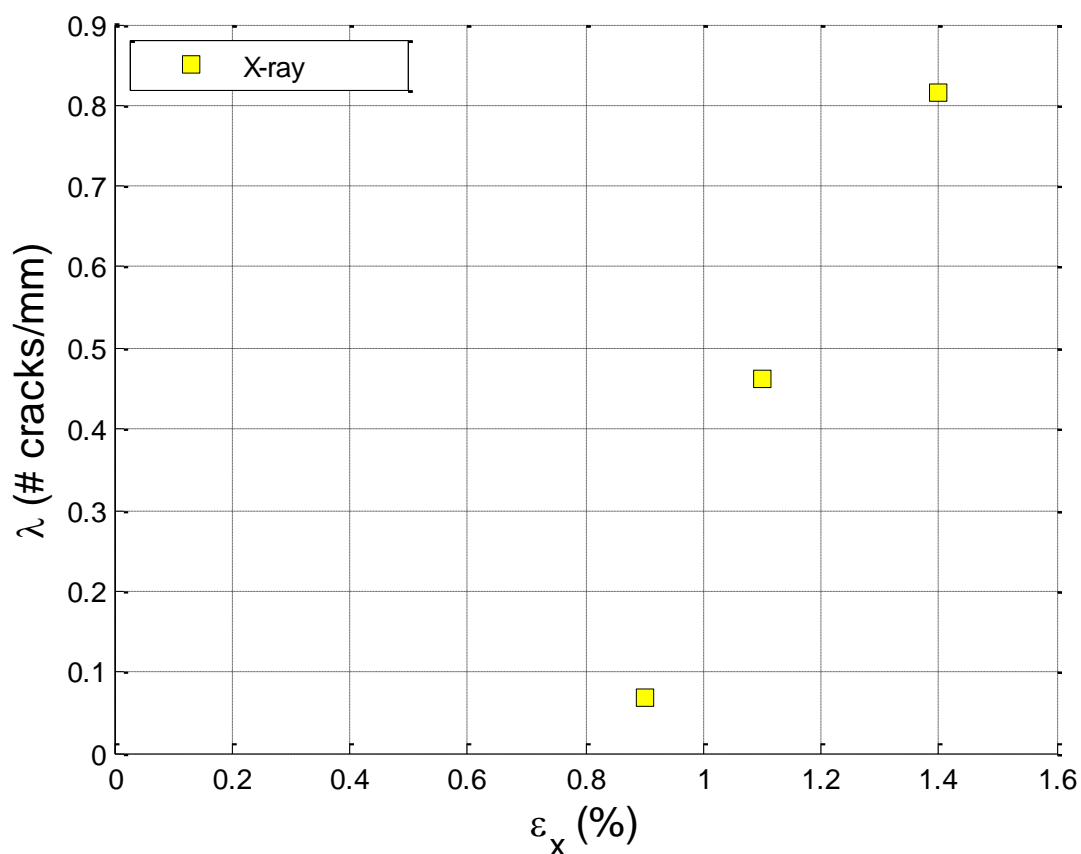


Figura 4.1. Densidad de fisuras frente a deformación. Lecturas obtenidas en la radiografía de cada etapa de la probeta A-1

La tabla 4.1 muestra un resumen de las nuevas fisuras obtenidas así como del número de eventos registrados por el sistema de Emisiones Acústicas para cada una de las etapas de deformación de la probeta A-1.

<u>Etapas</u>	<u>Deformación máxima (%)</u>	<u>Nuevas fisuras en radiografía</u>	<u>Número de eventos en AE</u>
a	0,90	7	40
b	1,10	40	102
c	1,40	36	290

Tabla 4.1. Resumen de los resultados del ensayo A-1 en cada etapa

Primera etapa: $\varepsilon_a = 0,90\%$

De acuerdo con lo expuesto en el procedimiento anterior, la primera fase consiste en la identificación de las fisuras formadas durante la primera etapa de deformación.

Es posible ilustrar el desarrollo de las fases del procedimiento de validación para la primera etapa ya que el número de fisuras en la muestra ($n_a^{xray} = 7$) y el número de eventos recogidos por el AE ($n_a^{AE} = 40$) es reducido, como se puede observar en la figura 4.2.

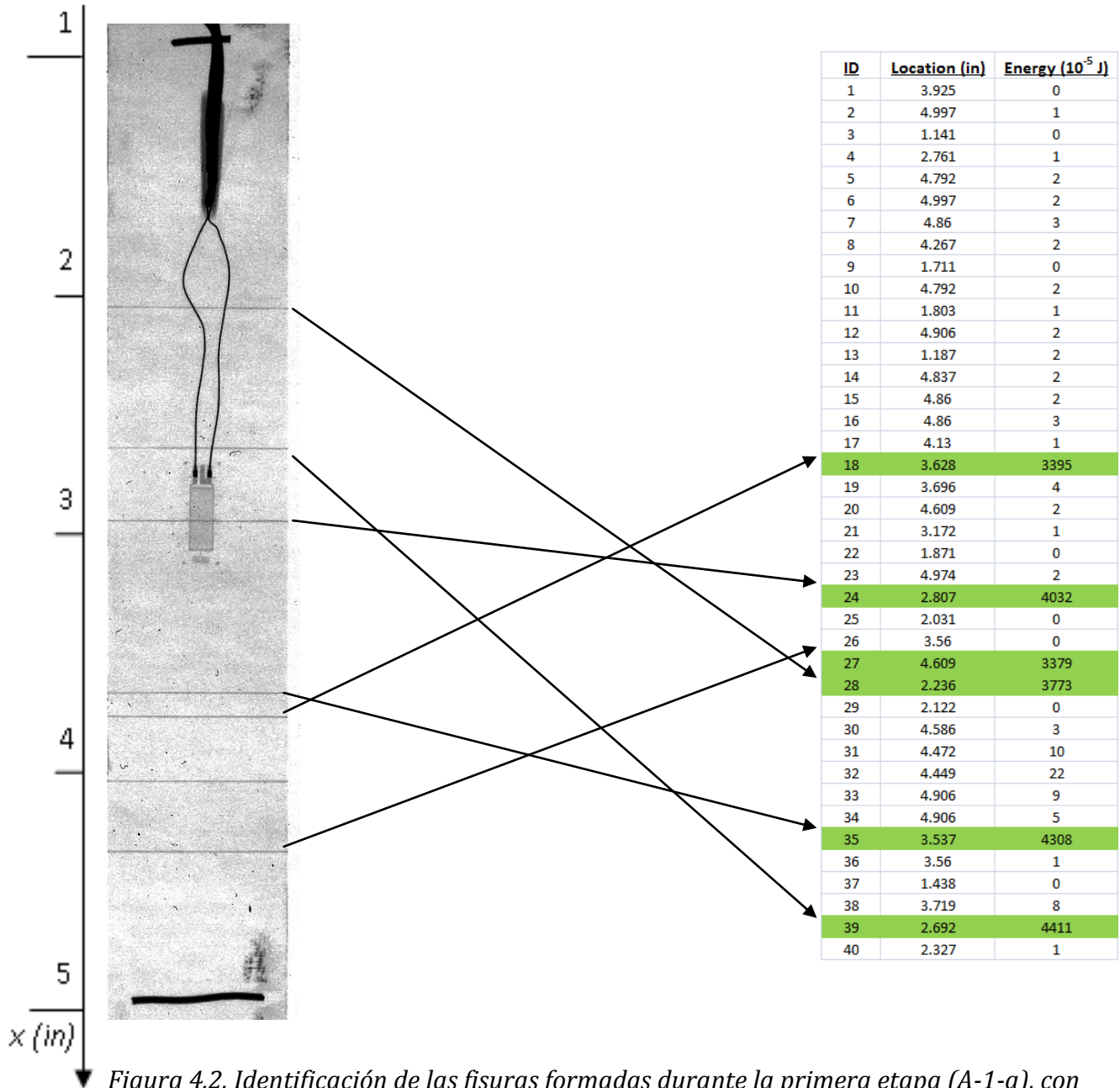


Figura 4.2. Identificación de las fisuras formadas durante la primera etapa (A-1-a), con una deformación de 0,90%. Radiografía obtenida (izquierda) y tabla resumen de resultados obtenidos por AE (derecha)

En la siguiente tabla (tabla 4.2) se muestran los datos registrados por el AE en la primera etapa de deformación del ensayo (A-1-a).

ID	Rise (μ s)	Counts	Amplitud (dB)	Duration (μ s)	Energy (10^{-5} J)	Average Frequency (kHz)	Centroid Frequency (kHz)	Peak Frequency (kHz)
1	0	1	50	44	0	91	227	185
2	22	2	54	114	1	114	240	186
3	0	1	49	57	0	123	211	157
4	6	3	50	79	1	103	223	240
5	2	3	53	117	2	111	227	170
6	8	4	57	86	2	151	207	185
7	2	5	54	164	3	122	207	184
8	55	3	55	95	2	168	219	187
9	3	2	47	49	0	286	248	264
10	19	2	51	161	2	100	218	158
11	6	3	48	76	1	231	229	240
12	9	3	52	131	2	158	218	178
13	7	5	54	101	2	119	229	197
14	9	3	52	131	2	158	214	178
15	9	5	54	135	2	111	212	177
16	20	5	54	109	3	161	215	186
17	16	5	54	83	1	205	313	422
18	170	196	99	3664	3395	85	233	114
19	45	17	59	162	4	142	225	172
20	20	4	53	129	2	138	215	180
21	53	2	50	76	1	66	224	189
22	0	1	51	29	0	333	228	184
23	8	1	53	95	2	137	235	264
24	37	398	99	4278	4032	94	213	115
25	4	2	53	51	0	500	343	462
26	0	1	48	15	0	133	232	141
27	81	215	99	3746	3379	94	216	108
28	47	305	99	4143	3773	74	223	108
29	40	2	48	44	0	91	248	118
30	2	1	58	92	3	500	222	180
31	56	32	66	268	10	147	199	186
32	57	45	72	406	22	122	204	186
33	15	14	60	252	9	131	202	180
34	22	6	58	176	5	136	214	187
35	59	257	99	4263	4308	89	214	114
36	0	1	47	110	1	36	156	0
37	0	1	48	24	0	333	235	199
38	47	25	63	224	8	146	234	172
39	126	384	99	4433	4411	87	211	115
40	6	10	53	88	1	235	251	140

Tabla 4.2. Resumen de los resultados obtenidos para los eventos registrados por AE en el ensayo A-1-a; se han resaltado los eventos asociados a la formación de fisuras en la muestra

Observaciones:

De esta primera etapa se concluye que la formación de fisuras produce una emisión acústica de elevada amplitud, duración y energía con respecto al resto de eventos capturados (figura 4.3). Sin embargo, en esta primera etapa, con un nivel de deformación alcanzado relativamente bajo (0,90%), aún no ha tenido lugar la ruptura de fibras, fenómeno que tiene asociada la liberación de una mayor cantidad de energía [20].

Además, cabe destacar que el número de fisuras formadas ha sido 7 y el número de eventos atribuidos a la formación de fisuras ha sido 6. Es decir, una de las fisuras aparecidas en la radiografía no ha sido detectada por el sistema de emisiones acústicas.

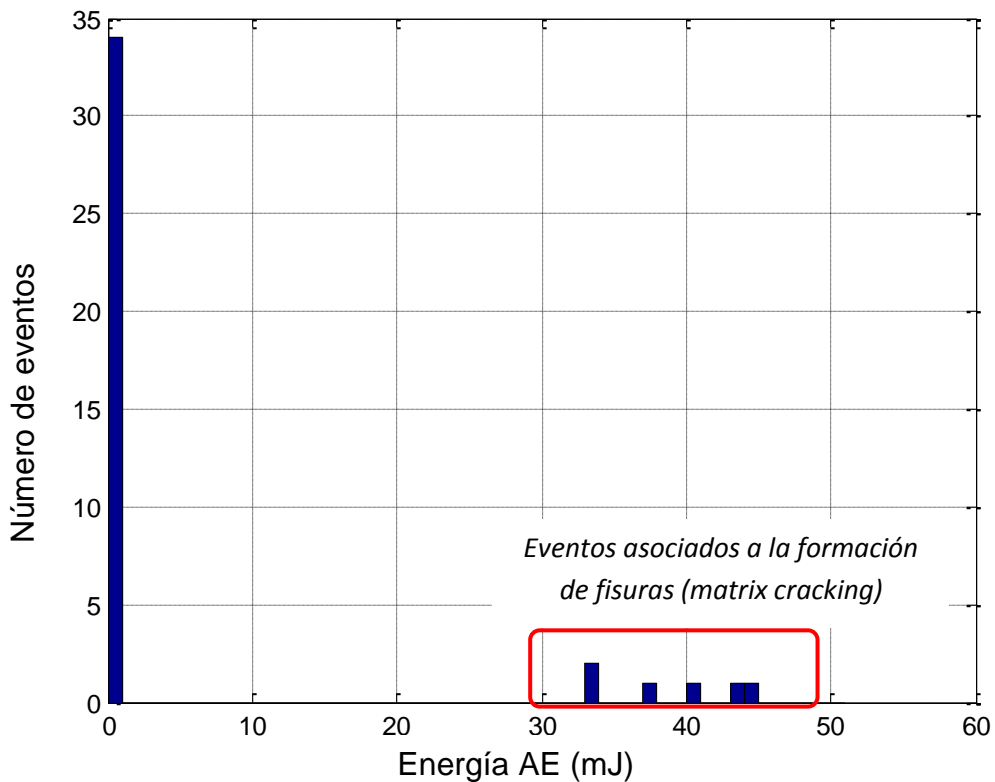


Figura 4.3. Número de eventos frente a energía. Ensayo A-1-a

Solamente se han descartado aquellos eventos que no se corresponden con las fisuras observadas en la radiografía y que, como se puede apreciar en la tabla 4.2, tienen un nivel de energía muy bajo.

Segunda etapa: $\varepsilon_b = 1,10\%$

El procedimiento es ejecutado de nuevo para la segunda etapa de deformación. En esta etapa, el número de nuevas fisuras en la muestra es más elevado ($n_b^{xray} = 40$) y el número de eventos registrados por AE es mucho mayor ($n_b^{AE} = 102$). Por ello, resulta más laborioso ilustrar directamente en este informe la ubicación de las fisuras y su identificación con los eventos de AE. En la figura 4.4 se muestra la radiografía obtenida después de realizar el ensayo para la segunda etapa de deformación (1,10%). El número total de fisuras contabilizado ha sido de 47 (7 de la primera etapa y 40 de la segunda etapa).

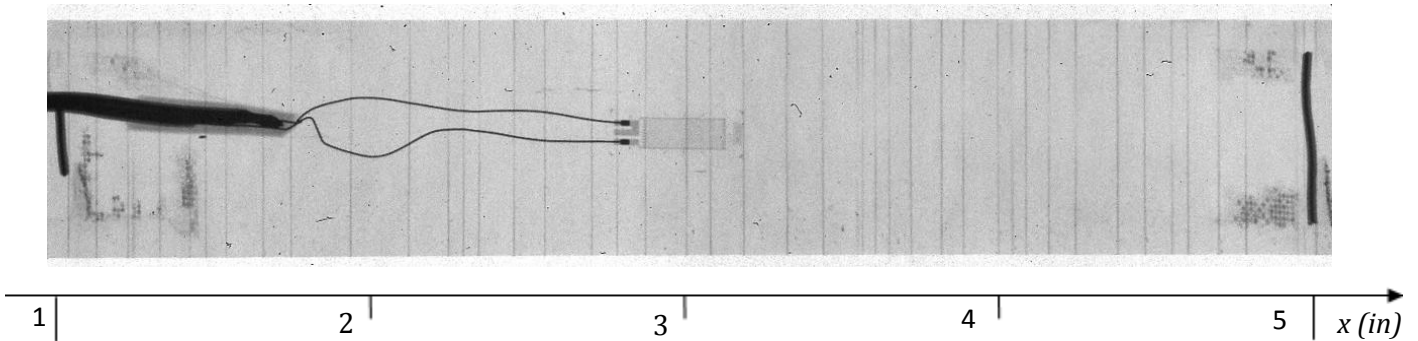


Figura 4.4. Radiografía obtenida tras el ensayo A-1-b, con una deformación de 1,10%

En el histograma mostrado en la figura inferior (figura 4.5) se han señalado los eventos que se corresponden con la formación de fisuras. Esta asociación se establece manualmente, comparando la ubicación de cada fisura en la radiografía con un evento en particular registrado por el sistema AE.

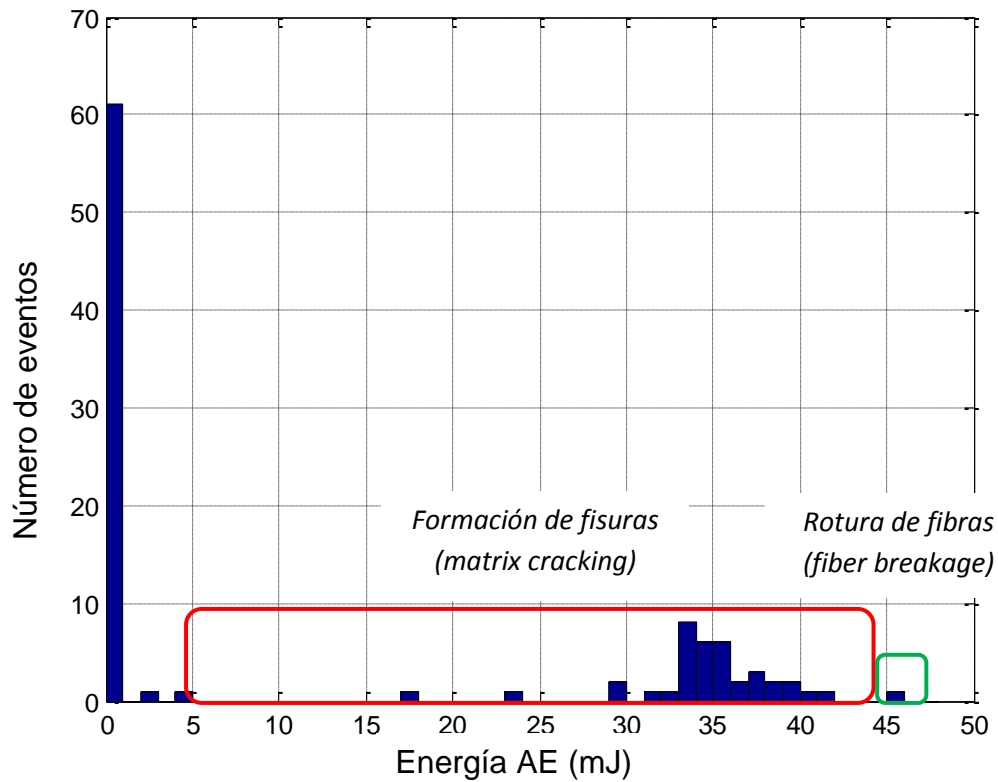


Figura 4.5. Número de eventos frente a energía. Ensayo A-1-b

Observaciones:

Los resultados obtenidos en esta etapa sostienen que la formación de fisuras en la matriz del compuesto genera una onda acústica de energía y amplitud superiores a la mayoría de los eventos. Sin embargo, también han aparecido dos eventos con una energía liberada aún mayor, lo que sugiere la aparición de nuevos fenómenos como la rotura de fibras.

Cabe destacar que en esta etapa en total se han identificado 37 eventos de AE asociados a la formación de fisuras frente a las 40 nuevas fisuras formadas. Lo que significa que tres eventos no han sido registrados por el AE.

Tercera etapa: $\varepsilon_c = 1,40\%$

En la tercera etapa, el número de nuevas fisuras ha sido de 36 (n_c^{xray}) y el número de eventos recogidos por AE ha sido de 290 (n_c^{AE}).

Como sucedía en la etapa anterior, el número de eventos capturados por AE es demasiado elevado para poder ilustrarlo de forma explícita en este informe. No obstante, el procedimiento seguido es el mismo que en las etapas anteriores.

La radiografía obtenida tras esta etapa de deformación se muestra a continuación (figura 4.6). El número total de fisuras contabilizado ha sido de 83 (7 de la primera etapa, 40 de la segunda etapa y 36 de la tercera etapa).

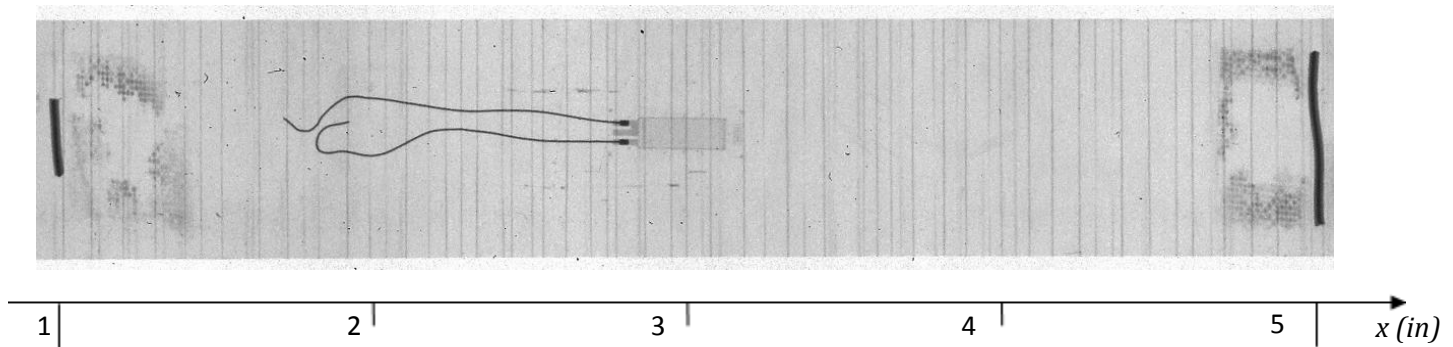


Figura 4.6. Radiografía obtenida tras el ensayo A-1-c con una deformación de 1,40%

En el histograma mostrado en la figura inferior (figura 4.7) se han señalado los eventos que corresponden a la formación de fisuras, así como los eventos relativos a fenómenos con mayor liberación de energía.

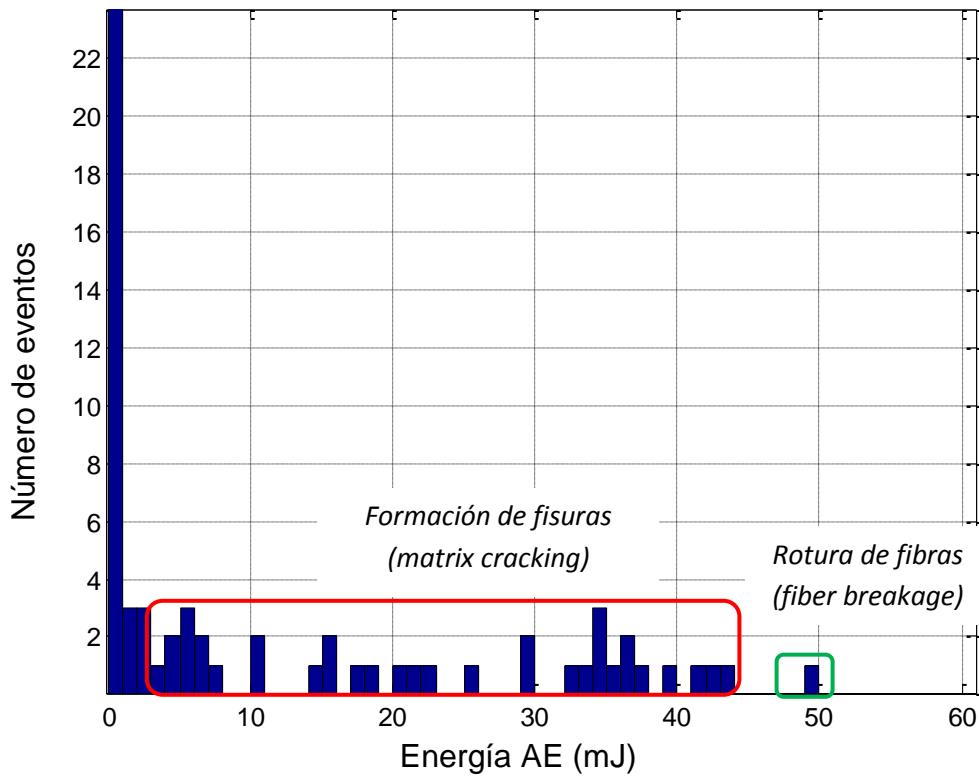


Figura 4.7. Número de eventos frente a energía. Ensayo A-1-c

Observaciones:

Al igual que en las dos etapas anteriores, los resultados obtenidos en esta etapa siguen demostrando que las emisiones acústicas generadas durante la formación de una fisura en la matriz del material compuesto poseen mucha mayor energía que la mayoría de los eventos capturados. Así mismo, algunos fenómenos liberan cantidades de energía aún mayores, por lo que no se consideran como aparición de fisuras.

En esta etapa cada una de las 36 nuevas fisuras formadas ha sido identificada con un evento registrado en AE.

Evaluación del ensayo

Finalmente, es posible elaborar un criterio que satisfaga con la mayor precisión la correspondencia entre eventos registrados frente a fisuras observadas a lo largo de todo el ensayo.

Observando la distribución de energía liberada por cada evento durante todo el ensayo (figura 4.8) se puede estimar una cota inferior y una superior, en términos de energía, que se adapte a los datos observados.

Los valores límite de energía por los que se ha optado son 3 mJ, como cota inferior, y 45 mJ, como cota superior.

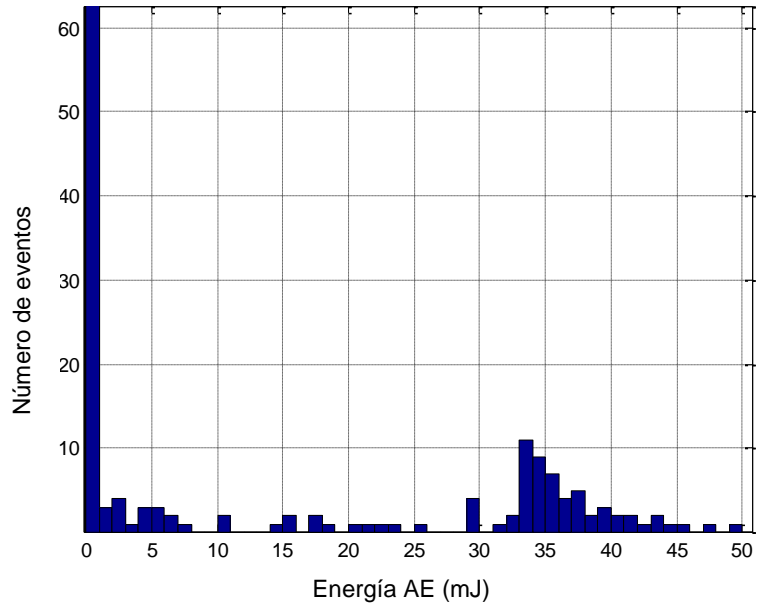


Figura 4.8. Número de eventos frente a energía. Ensayo A-1

Los resultados obtenidos aplicando estos valores para el criterio se muestran en la tabla 4.3.

Etapa	Fisuras observadas en radiografía	Número de eventos en AE	Fisuras en AE	Eventos por debajo de la cota inferior	Eventos por encima de la cota superior
a	7	40	6	34	0
b	40	102	37	62	2
c	36	290	36	253	1
Final	83	432	79	349	3

Tabla 4.3. Comparación de resultados del criterio aplicado frente a las radiografías

El grado de correspondencia conseguido al emplear este criterio es:

$$c = 100 * \left(1 - \frac{|N_{final}^{Xray} - N_{final}^{AE}|}{N_{final}^{Xray}} \right) \% = 100 * \left(1 - \frac{|83 - 79|}{83} \right) \% = 95,18\% \quad (4.2)$$

En la siguiente figura (figura 4.9) se muestra la distribución de energía para los eventos capturados por el sistema de Emisiones Acústicas, así como las cotas superior e inferior elegidas.

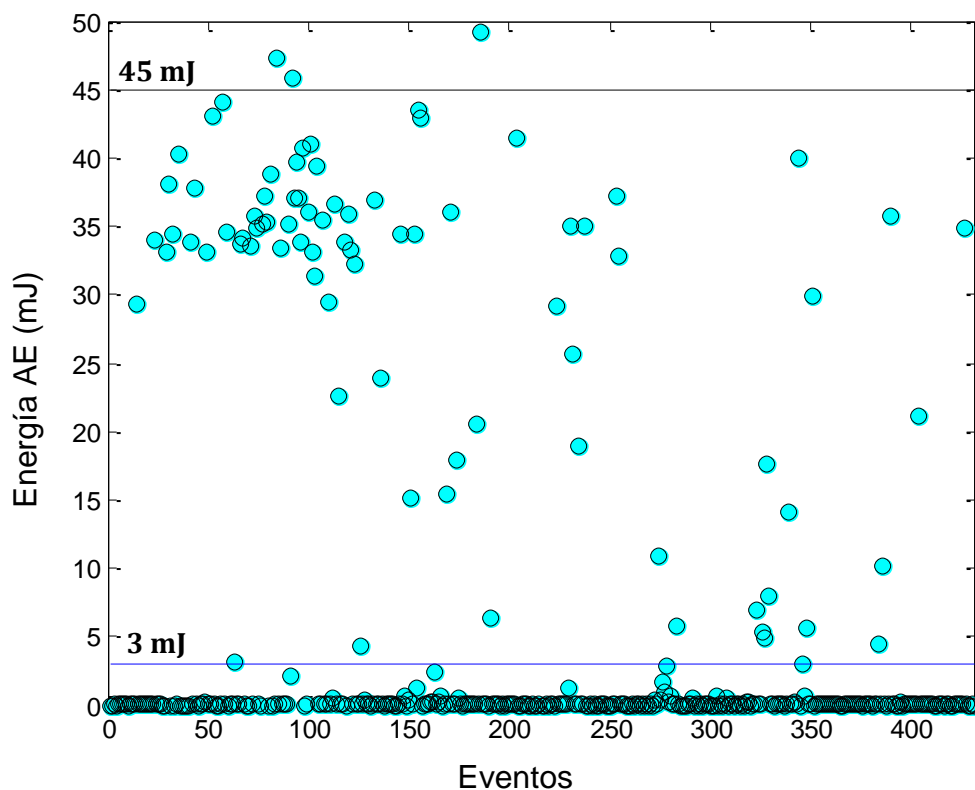


Figura 4.9. Distribución de energía de los eventos capturados por AE y representación de las cotas superior (45 mJ) e inferior (3 mJ)

Por último, cabe destacar que si bien es cierto que aplicando otras cotas los resultados parecen más exactos, en términos globales, probablemente se estará cometiendo un error al considerar como fisuras otros fenómenos de distinto origen.

4.1.2 Validación y filtrado de las emisiones acústicas: laminado B

La muestra ensayada para la validación y el filtrado de las emisiones acústicas para el laminado B ha sido la probeta B-1.

En el siguiente gráfico (figura 4.10) se presentan los resultados observados a través de las radiografías obtenidas tras cada etapa.

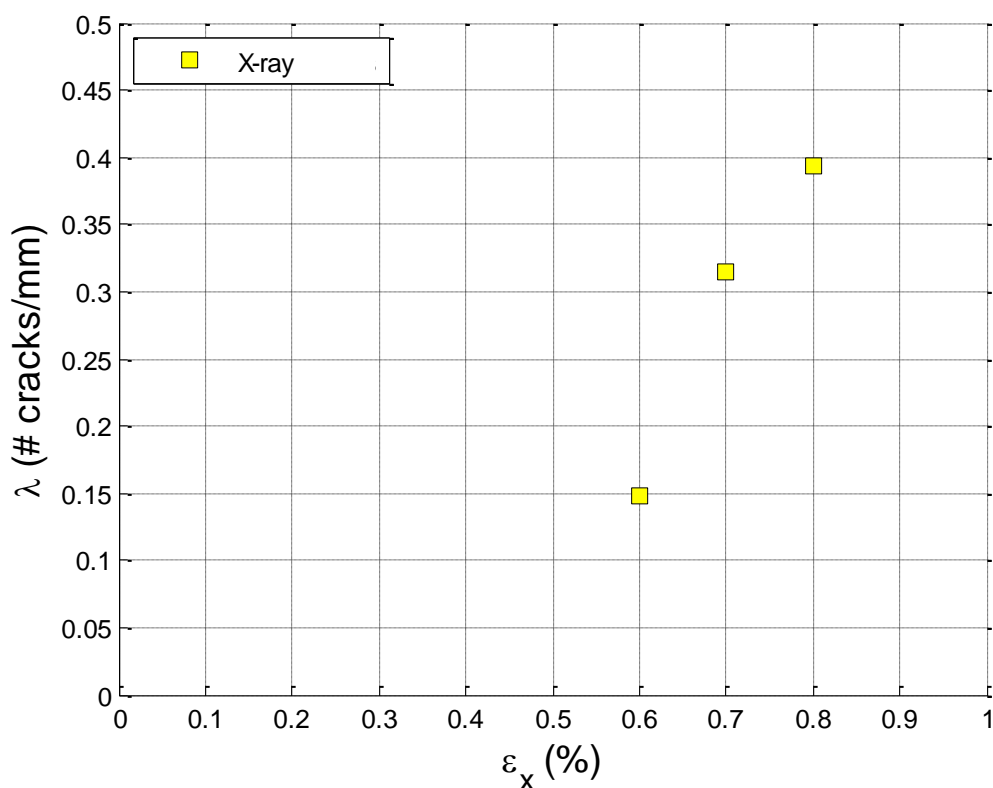


Figura 4.10. Densidad de fisuras frente a deformación. Lecturas obtenidas en la radiografía de cada etapa de la probeta B-1

La tabla 4.3 muestra un resumen de las nuevas fisuras obtenidas así como del número de eventos registrados por el sistema de Emisiones Acústicas para cada una de las etapas de deformación de la probeta B-1.

<i><u>Etapas</u></i>	<i><u>Deformación máxima (%)</u></i>	<i><u>Nuevas fisuras en radiografía</u></i>	<i><u>Número de eventos en AE</u></i>
a	0,60	15	50
b	0,70	16	239
c	0,80	8	492

Tabla 4.4. Resumen de los resultados del ensayo B-1 en cada etapa

Primera etapa: $\varepsilon_a = 0,60\%$

Es posible ilustrar el desarrollo de las fases del procedimiento de validación para la primera etapa ya que el número de fisuras en la muestra ($n_a^{Xray} = 15$) y el número de eventos recogidos por el AE ($n_a^{AE} = 50$) no es muy elevado, como se puede observar en la figura 4.11.

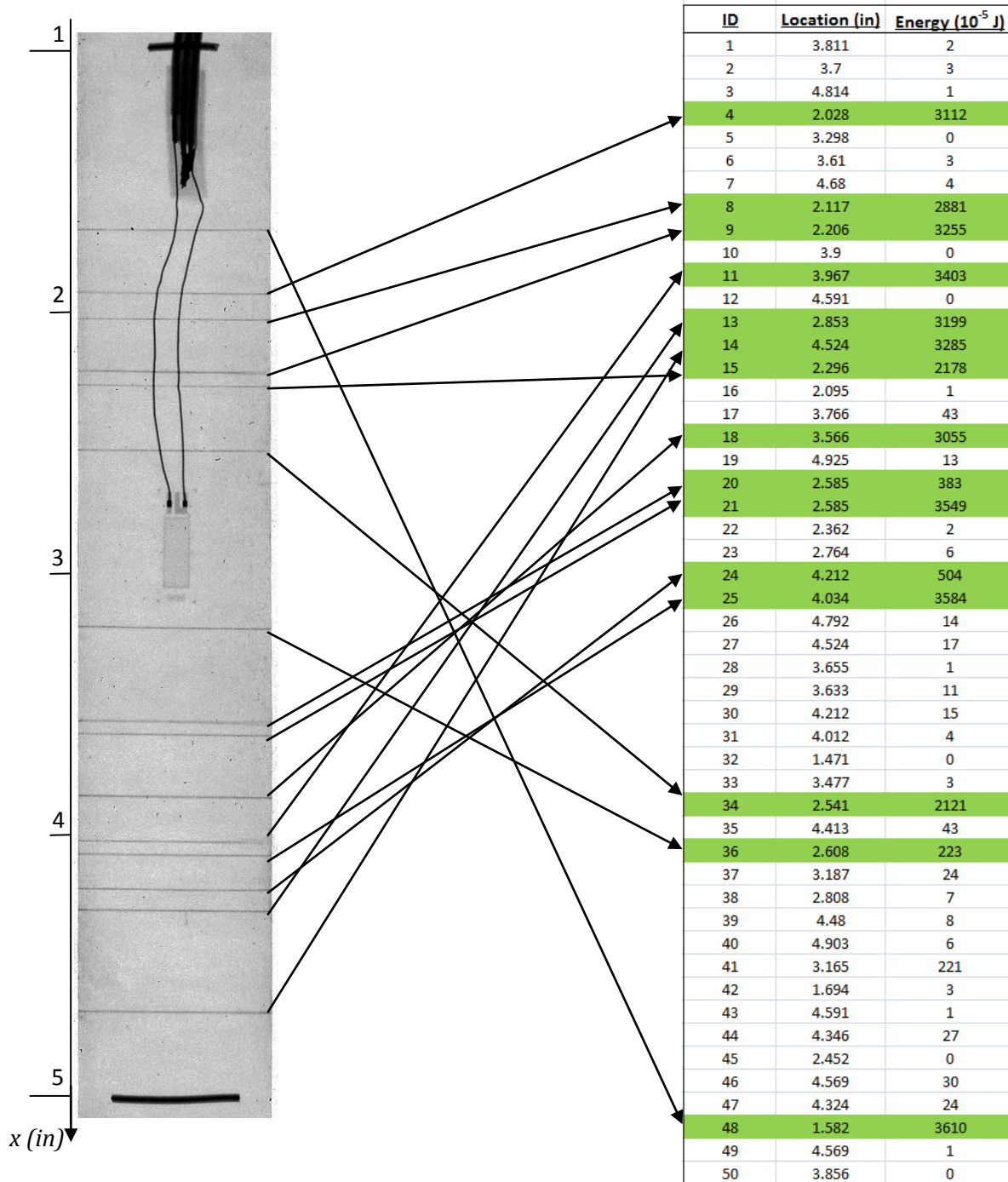


Figura 4.11. Identificación de las fisuras formadas durante la primera etapa (B-1-a) con una deformación de 0,60%. Radiografía obtenida (izquierda) y tabla resumen de resultados obtenidos por AE (derecha)

Se observa que la localización calculada por AE no resulta precisa. Esto puede deberse a que el cálculo de la velocidad no haya sido correcto o a otros factores que no se hayan controlado (colocación de los sensores, cantidad de adhesivo en los mismos...).

En la tabla 4.5 se muestran los datos registrados por el AE en la primera etapa de deformación del ensayo (B-1-a).

ID	Rise (μ s)	Counts	Amplitud (dB)	Duration (μ s)	Energy (10^{-5} J)	Average Frequency (kHz)	Centroid Frequency (kHz)	Peak Frequency (kHz)
1	7	3	51	123	2	176	200	185
2	21	5	57	126	3	152	193	169
3	17	4	51	62	1	154	214	171
4	12	325	99	3910	3112	83	254	117
5	0	1	47	35	0	114	233	0
6	27	16	58	165	3	119	223	135
7	45	1	56	171	4	117	191	185
8	12	299	99	3837	2881	87	244	135
9	99	331	99	4164	3255	83	246	136
10	27	8	49	39	0	235	316	427
11	52	18	99	4617	3403	136	241	136
12	4	1	47	35	0	250	253	426
13	210	316	99	4143	3199	128	240	242
14	73	290	99	4042	3285	98	251	182
15	68	180	99	3064	2178	71	272	428
16	42	5	56	73	1	260	326	422
17	90	31	76	351	43	160	186	185
18	621	229	99	3079	3055	81	219	187
19	61	13	68	229	13	122	226	186
20	66	215	88	1979	383	109	190	185
21	46	355	99	4164	3549	85	208	136
22	16	12	55	102	2	333	187	185
23	149	28	56	248	6	134	220	185
24	82	64	97	1268	504	92	189	187
25	100	281	99	4170	3584	84	212	185
26	67	17	68	234	14	124	170	186
27	66	21	71	222	17	140	186	186
28	26	7	52	52	1	135	214	166
29	74	23	66	231	11	147	208	186
30	74	22	70	293	15	124	191	185
31	52	8	60	158	4	133	207	177
32	0	3	50	44	0	132	328	495
33	16	6	52	111	3	189	271	186
34	99	164	99	2468	2121	165	251	118
35	76	21	74	278	43	176	190	186
36	359	135	91	1244	223	225	312	497
37	48	33	71	331	24	128	185	185
38	42	22	62	206	7	107	208	185
39	8	15	63	200	8	117	173	186
40	6	11	60	188	6	101	198	185
41	52	61	88	1217	221	106	187	185
42	13	13	57	128	3	126	184	172
43	8	1	49	51	1	157	221	185
44	72	16	70	236	27	182	192	186
45	30	7	50	38	0	184	209	182
46	56	12	70	271	30	159	192	186
47	69	14	69	223	24	188	189	186
48	155	355	99	4165	3610	89	241	137
49	0	2	50	51	1	250	217	185
50	0	1	49	43	0	116	194	185

Tabla 4.5. Resumen de los resultados obtenidos para los eventos registrados por AE en el ensayo B-1-a; se han resaltado los eventos asociados a la formación de fisuras en la muestra

Observaciones:

Como sucede en el laminado A, en este laminado la formación de fisuras produce una emisión acústica de elevada amplitud, duración y energía frente al resto de eventos capturados (figura 4.12).

Se han detectado 15 fisuras a través de la radiografía y todas ellas han sido identificadas con eventos recogidos por AE.

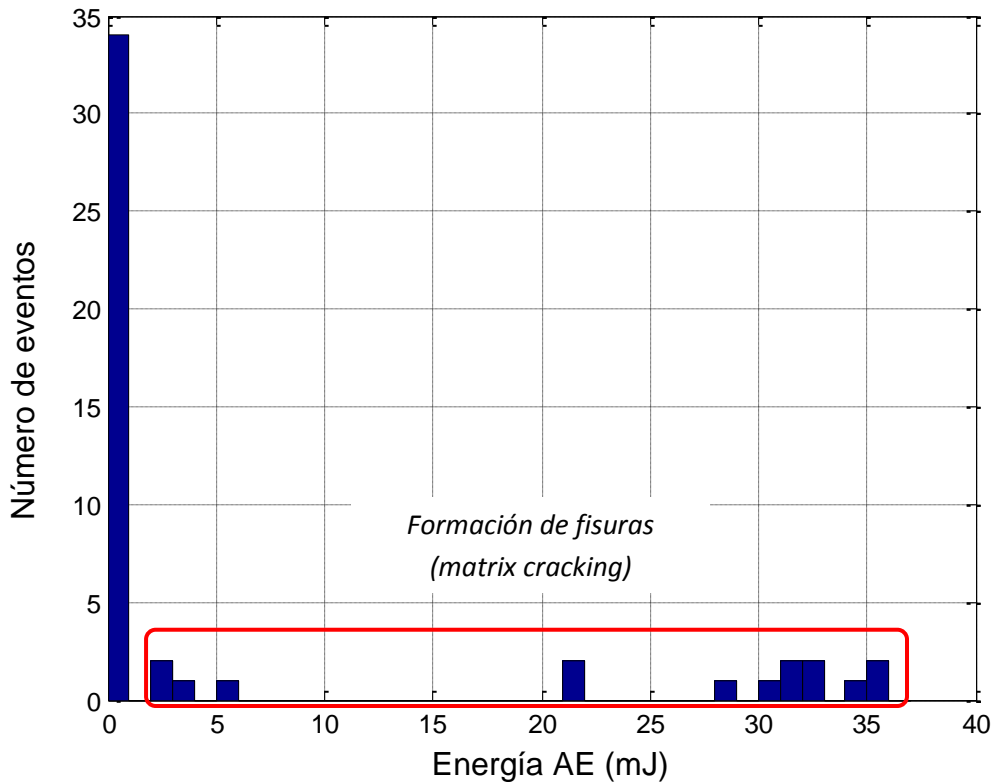


Figura 4.12. Número de eventos frente a energía. Ensayo B-1-a

Segunda y tercera etapa: $\varepsilon_b = 0,70\%$ y $\varepsilon_c = 0,80\%$

El procedimiento es ejecutado de nuevo para la segunda y la tercera etapa de deformación. Sin embargo, en estas etapas el número eventos en AE es tan elevado que no es viable detallar la localización ($n_b^{AE} = 239$ y $n_c^{AE} = 492$). No obstante, dicha localización fue realizada de forma semejante a la primera etapa.

En los siguientes gráficos (figura 4.13) se representa la distribución de energía de los eventos para las etapas b y c, con una deformación de 0,70% y 0,80% respectivamente.

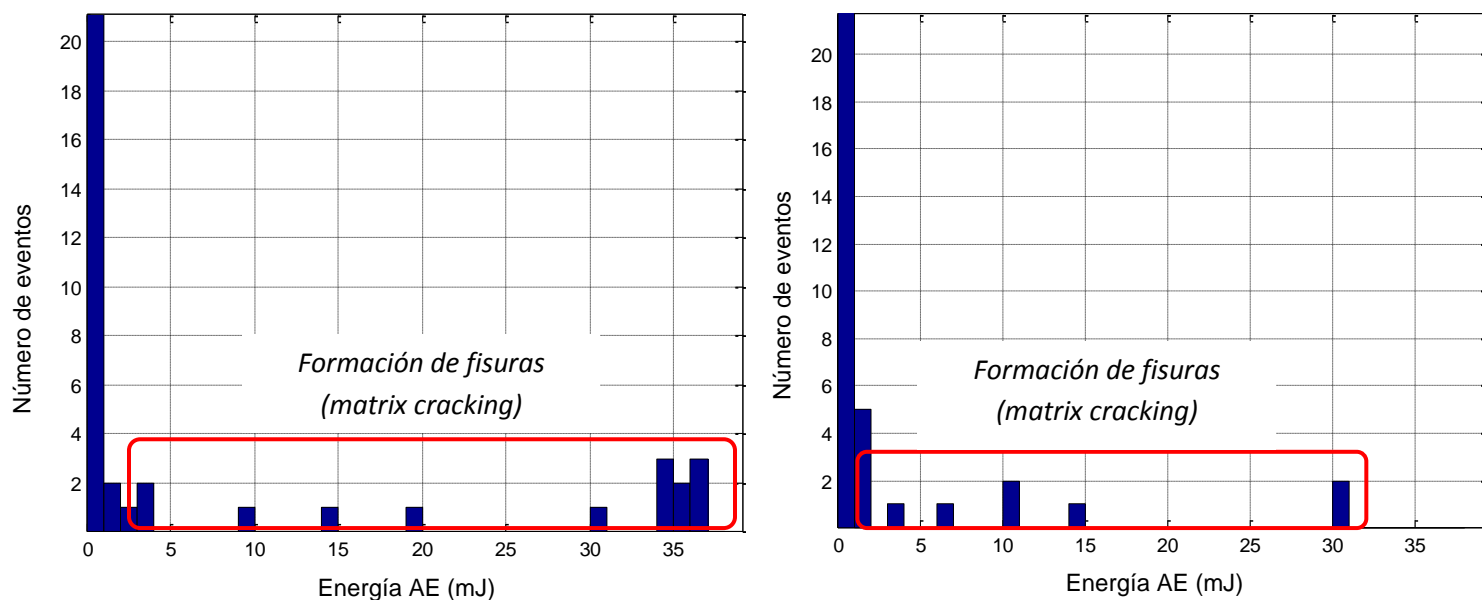


Figura 4.13. Número de eventos frente a energía. Ensayo B-1-b (izquierda) y ensayo B-1-c (derecha)

En la figura 4.14 se muestran las radiografías obtenidas para las etapas b y c, con una deformación de 0,70% y 0,80% respectivamente.

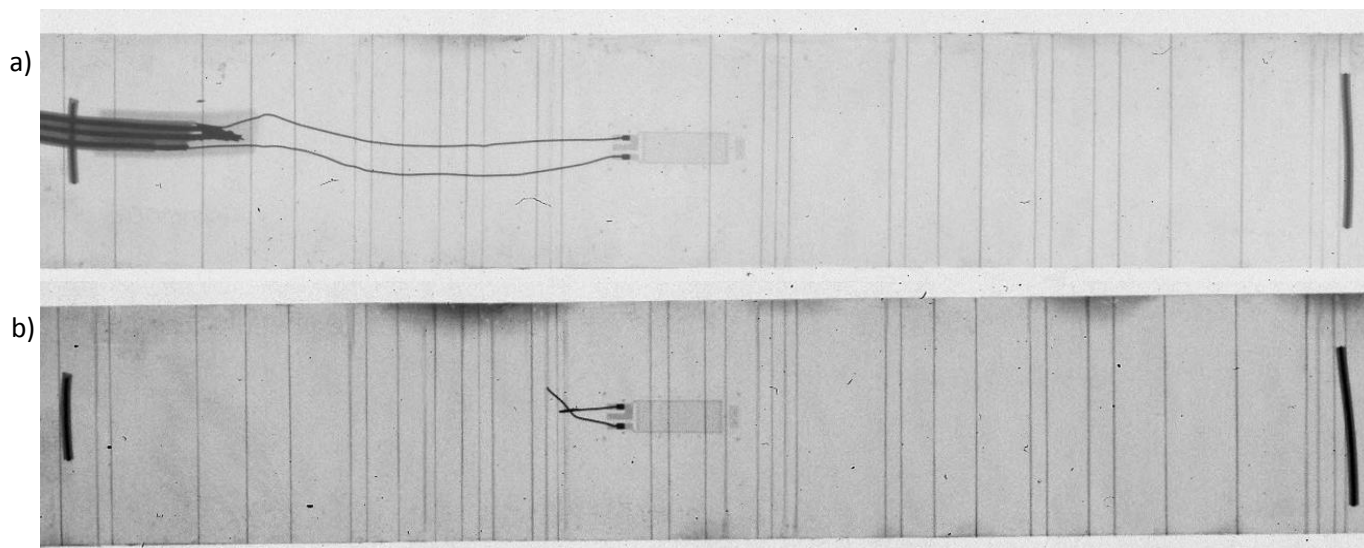


Figura 4.14. Radiografías realizadas tras la segunda etapa (a) y tras la tercera etapa (b) con una deformación de 0,70% y 0,80% respectivamente

Observaciones:

A diferencia de lo que ocurría en el laminado A, en este laminado no se observan eventos con energía muy elevada. Esto se debe a que el laminado B se ha llevado hasta una deformación máxima de 0,80%, ya que su secuencia de apilamiento no posee laminas orientadas en la dirección de la carga ($[\pm 25/90_{10}/\pm 25]$). El fallo de la probeta aparece en torno a 0,85% de deformación según otros ensayos realizados previamente.

Se han detectado 16 y 8 nuevas fisuras en la segunda y tercera etapas respectivamente. El número de eventos identificados como formación de fisuras ha sido de 15 y 8, por lo que se ha conseguido un buen grado de correspondencia.

Evaluación del ensayo

Al igual que en el laminado A, es posible elaborar un criterio que se adapte con la mayor exactitud a los resultados que se observan en las radiografías y a los eventos que recopila es sistema AE.

Mediante la identificación manual entre eventos y fisuras se puede estimar una cota inferior en términos de energía que se adapte a los datos observados. Nótese que para este laminado no es necesario establecer una cota superior, ya que como se ha comentado previamente, no han tenido lugar fenómenos con alta liberación de energía (figura 4.15).

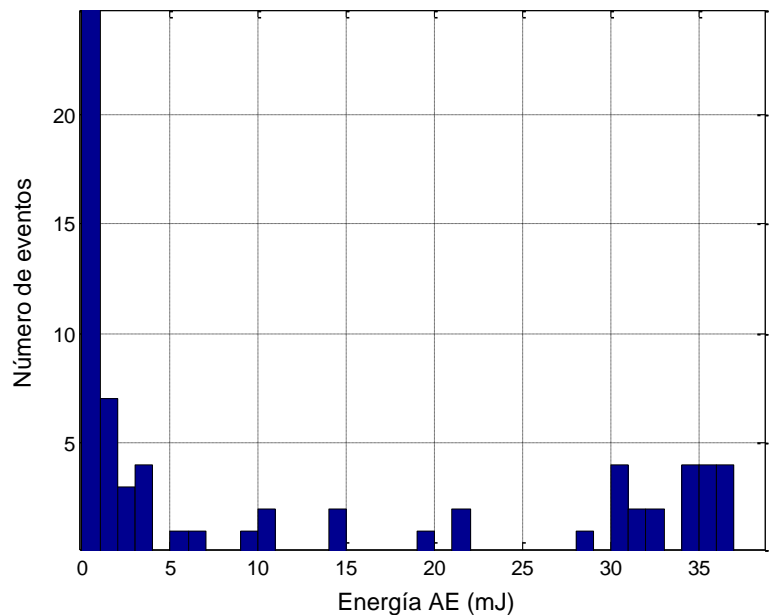


Figura 4.15. Número de eventos frente a energía durante las tres etapas del ensayo B-1

El valor límite de energía elegido para la cota inferior ha sido de 2,22 mJ.

Los resultados obtenidos aplicando este valor se muestran en la tabla 4.6.

Etap	Fisuras observadas en radiografía	Número de eventos en AE	Fisuras en AE	Eventos por debajo de la cota inferior
a	15	50	15	35
b	16	239	15	224
c	8	492	8	484
Final	39	781	38	743

Tabla 4.6. Comparación de resultados del criterio aplicado frente a las radiografías

El grado de correspondencia conseguido al emplear este criterio es:

$$c = 100 * \left(1 - \frac{|N_{final}^{Xray} - N_{final}^{AE}|}{N_{final}^{Xray}} \right) \% = 100 * \left(1 - \frac{|39 - 38|}{39} \right) \% = 97,44\% \quad (4.3)$$

Además, en la figura 4.16 se observa que imponiendo las mismas cotas (superior e inferior) para el laminado A y para el laminado B se consigue satisfacer con gran exactitud la correspondencia entre fisuras y eventos. La cota inferior es de 3 mJ y la cota superior es de 45 mJ. Este hecho resulta de gran interés, ya que confirma que la formación de fisuras en modo I puro de fractura posee un rango propio de energía acústica para dos laminados diferentes.

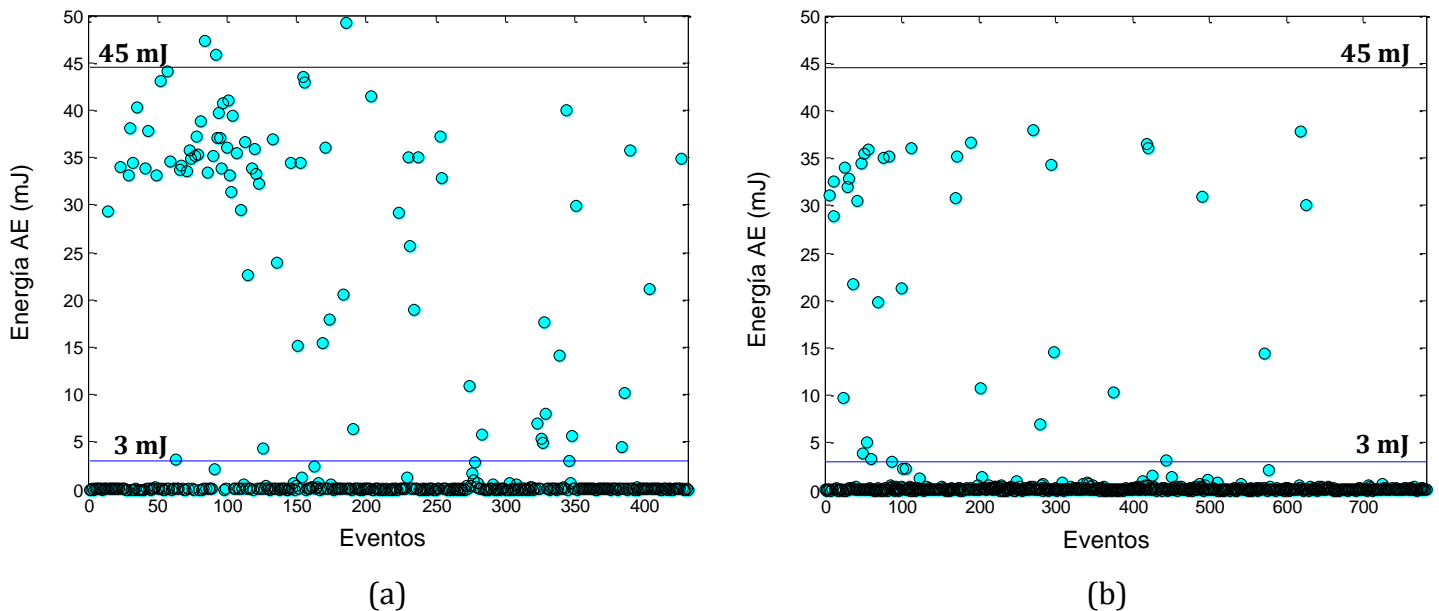


Figura 4.16. Distribución de la energía en los eventos registrados para la muestra A-1 (a) y B-1 (b). También se representan la cota inferior (en azul) y la cota superior (en negro) para el criterio de energía

Estudiando en profundidad los eventos atribuidos a la formación de fisuras para ambos laminados, se ha descubierto que se puede aplicar como criterio el producto de la amplitud por la energía.

$$\text{cota inferior} < \text{amplitud}_i \cdot \text{energía}_i < \text{cota superior} \begin{cases} \text{sí, el evento } i \text{ representa una fisura} \\ \text{no, el evento } i \text{ no representa una fisura} \end{cases}$$

Los resultados que se obtienen de aplicar este criterio son muy similares para el laminado A (tabla 4.7).

Las cotas aplicadas para este criterio son 270 mJ·dB y 4400 mJ·dB como límites inferior y superior respectivamente.

En las siguientes gráficas (figura 4.17) se muestran en azul los eventos captados por el sistema de Emisiones Acústicas en las probetas A-1 y B-1. Los puntos que se encuentran entre el límite inferior y el límite superior son aquellos que se identificaron como fisuras en las radiografías.

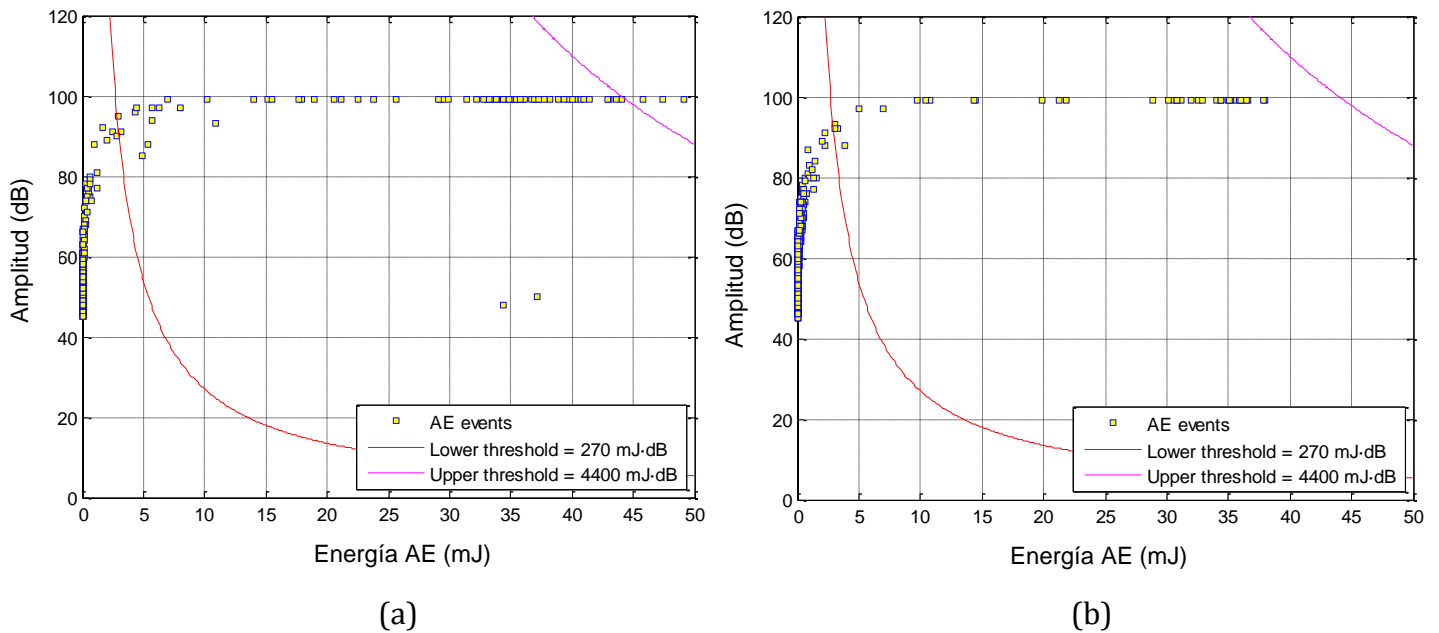


Figura 4.17. Distribución de la amplitud frente a la energía en los eventos evaluados para la muestra A-1 (a) y B-1 (b). Se representan la cota inferior (en rojo) y la cota superior (en magenta)

En la tabla 4.7 se muestra el grado de correspondencia obtenido entre las radiografías y los eventos filtrados de AE para cada uno de los criterios. Si bien es cierto que no existen variaciones apreciables entre ambos criterios, el criterio de la energía por la amplitud se introduce en este punto para añadir homogeneidad al apartado de resultados, ya que los laminados C y D se ajustan con mayor exactitud a este último criterio.

	Criterio: Energía (3,0 – 45,0 mJ)		Criterio: Energía x Amplitud (270 – 4400 mJ·dB)	
	N^{Xray}	$N^{AE} (c)$	N^{Xray}	$N^{AE} (c)$
A-1	83	79 (95,18%)	83	80 (96,38%)
B-1	39	38 (97,44%)	39	38 (97,44%)

Tabla 4.7. Comparación de resultados según el criterio empleado para las muestras A-1 y B-1. Número de fisuras detectadas por AE, número de fisuras observadas en las radiografías y grado de correspondencia

La aplicación del criterio del producto de la energía por la amplitud máxima es equivalente al criterio simple de la energía, pero aporta un contraste mucho mayor a los eventos registrados. De esta forma, por ejemplo, se descartan fácilmente aquellos eventos que generan una onda acústica de baja intensidad, pero de elevada duración acumulando una cantidad de energía notable. Por el contrario, los eventos de muy baja duración, pero de muy alta amplitud se vuelven reconocibles (figura 4.18).

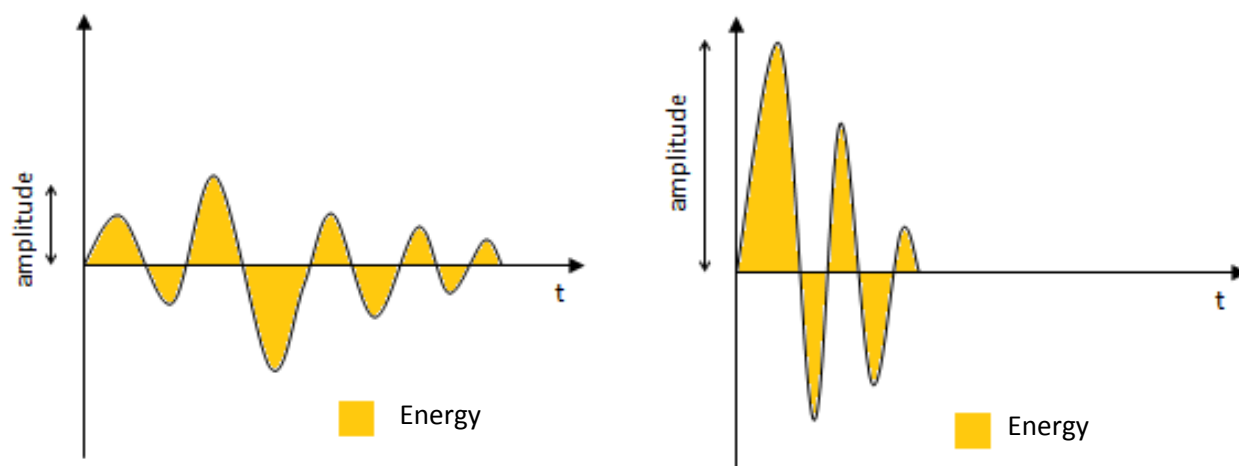


Figura 4.18: Representación de la energía y la amplitud máxima de dos ondas acústicas

La expresión analítica del criterio de energía por amplitud máxima queda representada en la siguiente expresión:

$$P_i = \max(A_i) \cdot \int_{t_0}^{t_f} |I_i(t)| \cdot dt \quad (4.4)$$

4.1.3 Resultados para los laminados A y B

El criterio aplicado en toda esta sección es el producto de la energía por la amplitud. La cota inferior es 270 mJ·dB y la cota superior es 4400 mJ·dB, tal y como se muestra al final del apartado anterior.

En la tabla 4.8 se resumen los resultados obtenidos para cada uno de los laminados estudiados. Para ambos laminados, la probeta número 1 ha sido ensayada en tres etapas y las probetas 2 y 3 han sido ensayadas sin realizar paradas intermedias.

		Etapas		
		a	b	c
A	A-1	7 (0,90%)	40 (1,10%)	36 (1,40%)
	A-2	-	-	77 (1,40%)
	A-3	-	-	70 (1,40%)
B	B-1	15 (0,60%)	16 (0,70%)	8 (0,80%)
	B-2	-	-	46 (0,80%)
	B-3	-	-	36 (0,80%)

Tabla 4.8. Resumen de los ensayos realizados para las muestras de los laminados A y B,
 $n_i^{xray}(\varepsilon_{x,max})$

4.1.3.1 Laminado A

Una vez estudiados los eventos y descartados aquellos que no corresponden a la formación de fisuras, es posible representar la densidad de fisuras por unidad de longitud. En la figura 4.19 está representada la densidad de fisuras frente a la deformación longitudinal (ε_x) para la muestra A-1.

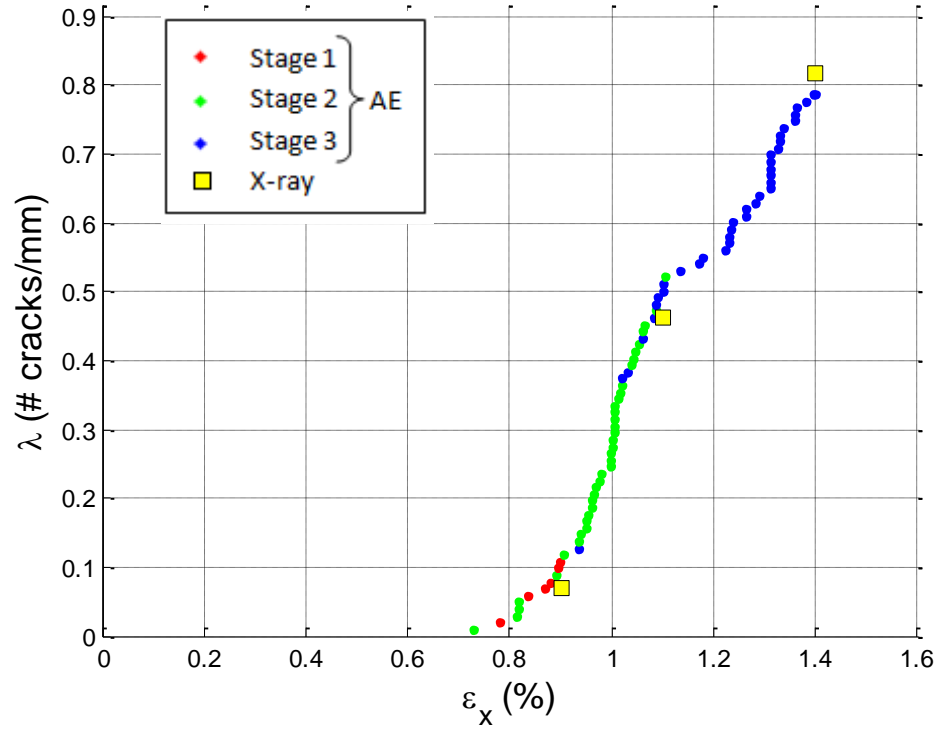
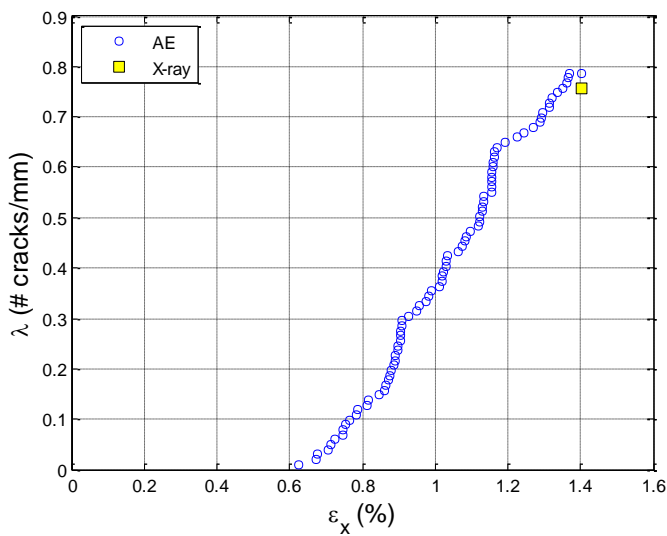
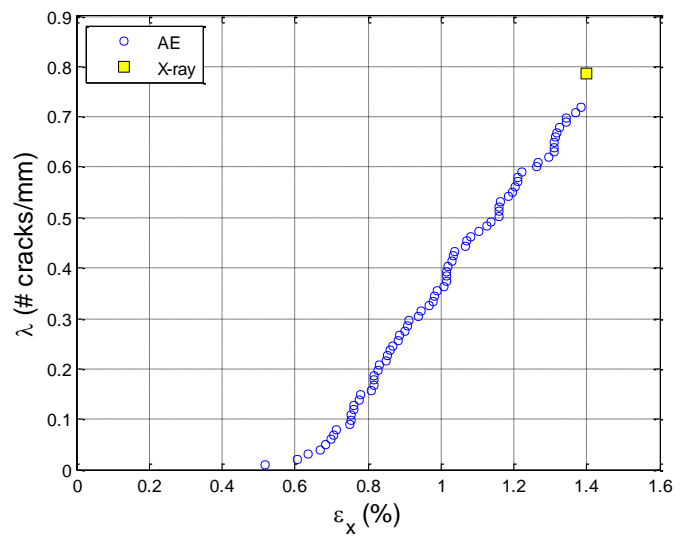


Figura 4.19. Densidad de fisuras frente a deformación. Probeta A-1

Se han ensayado dos probetas más del laminado A: A-2 y A-3. En este caso, las probetas se han llevado hasta la misma deformación final (1,40%) en una sola etapa. Finalmente, se ha realizado una radiografía de cada una de ellas como comprobación adicional (figura 4.21).



(a)



(b)

Figura 4.20. Densidad de fisuras frente a deformación. Probeta A-2 (a) y probeta A-3 (b)

En la figura 4.20 se ha representado el registro filtrado de las señales de AE (círculos azules) y la densidad de fisuras medida en las radiografías al final de los ensayos (cuadrados amarillos).

Se observa una buena correspondencia final entre los resultados aportados por el sistema de AE y los resultados observados en las radiografías.

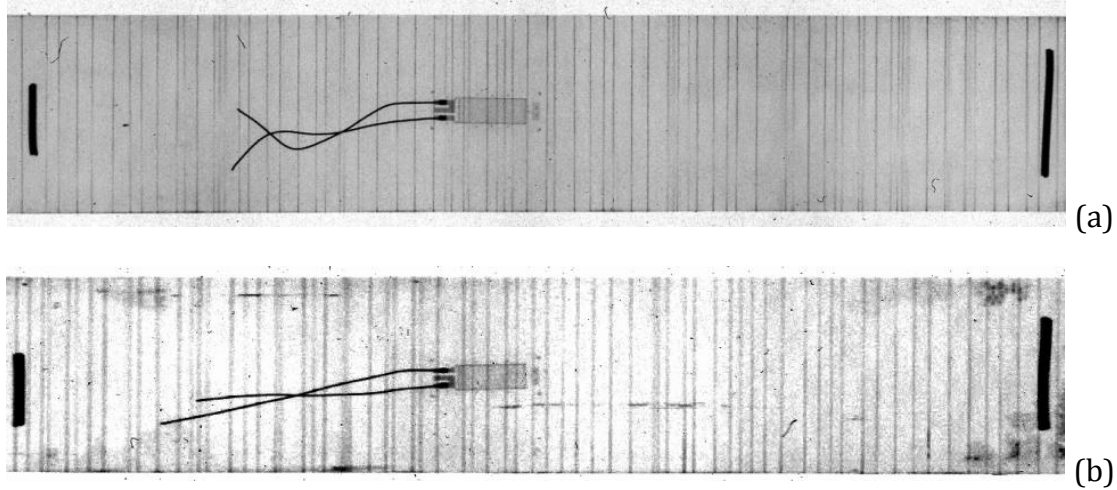


Figura 4.21. Radiografías de las muestras A-2 (a) y A-3 (b) con un 1,40% de deformación

Por último, se ha realizado una comparación entre los resultados obtenidos de los tres ensayos con el laminado A (figura 4.22). Con ello, se comprueba la similitud de los resultados obtenidos.

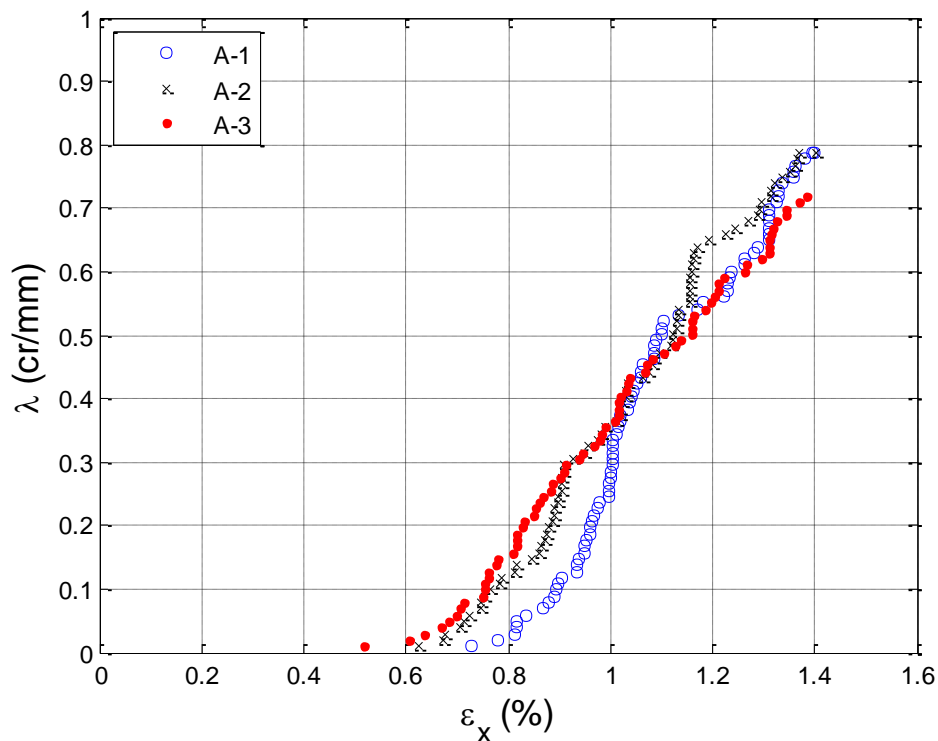


Figura 4.22. Densidad de fisuras frente a deformación para las tres probetas del laminado A $[0/90_4]_s$

4.1.3.2 Laminado B

Al igual que en el laminado A, aplicando el criterio considerado, se calcula la evolución de la densidad de fisuras con la deformación para el laminado B. En la figura 4.23 está representada la densidad de fisuras frente a la deformación longitudinal (ε_x) para la muestra B-1.

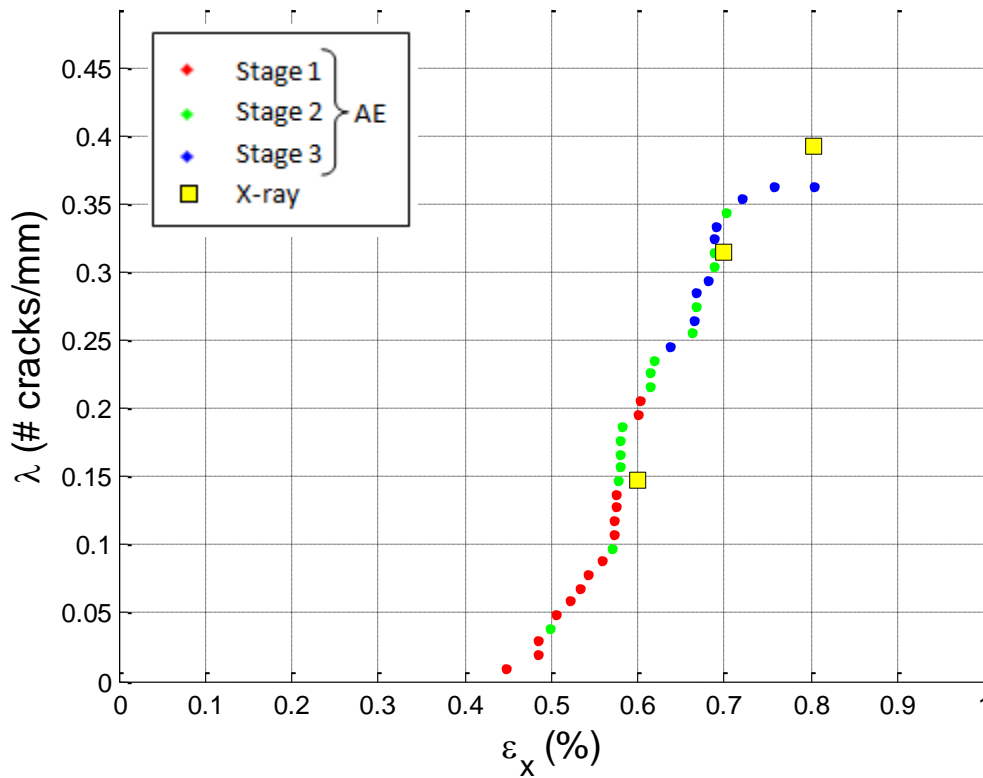
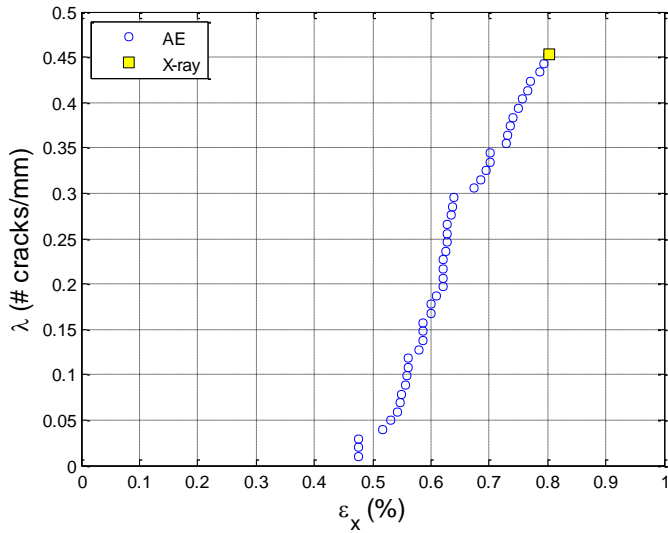


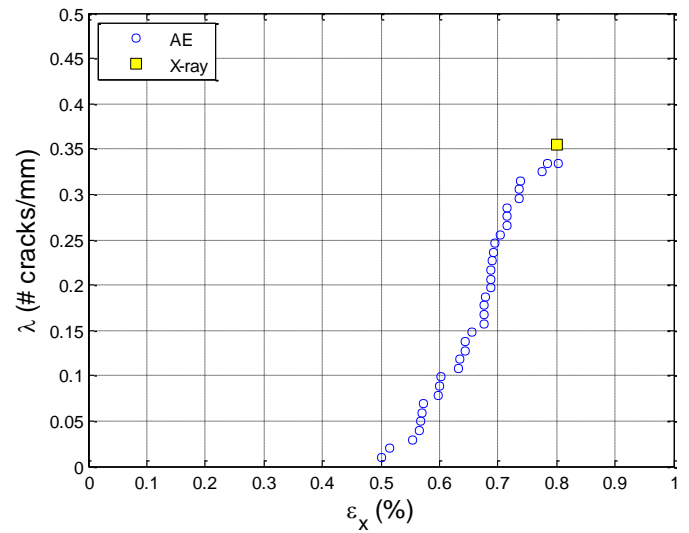
Figura 4.23. Densidad de fisuras frente a deformación. Probeta B-1

Análogamente al laminado anterior, se han ensayado dos probetas más del laminado B: B-2 y B-3. En este caso, las probetas se han llevado hasta la misma deformación final (0,80%) en una sola etapa. Finalmente, se ha realizado una radiografía de cada una de ellas como comprobación adicional (figura 4.25).

En la figura 4.24 se observa una buena correlación entre los resultados observados en las radiografías y el filtrado de la señal de AE.



(a)



(b)

Figura 4.24. Densidad de fisuras frente a deformación. Probeta B-2 (a) y probeta B-3 (b)

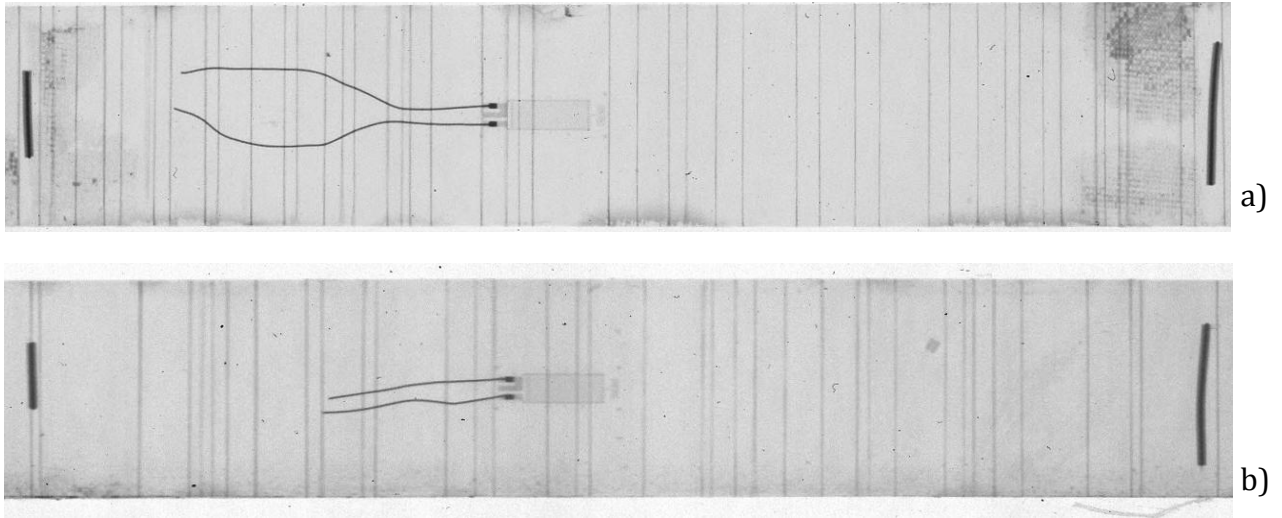


Figura 4.25. Radiografías de las muestras B-2 (a) y B-3 (b) con 0,80% de deformación

Por último, se muestran los resultados de los tres ensayos en la misma gráfica para comprobar la semejanza entre ellos (figura 4.26).

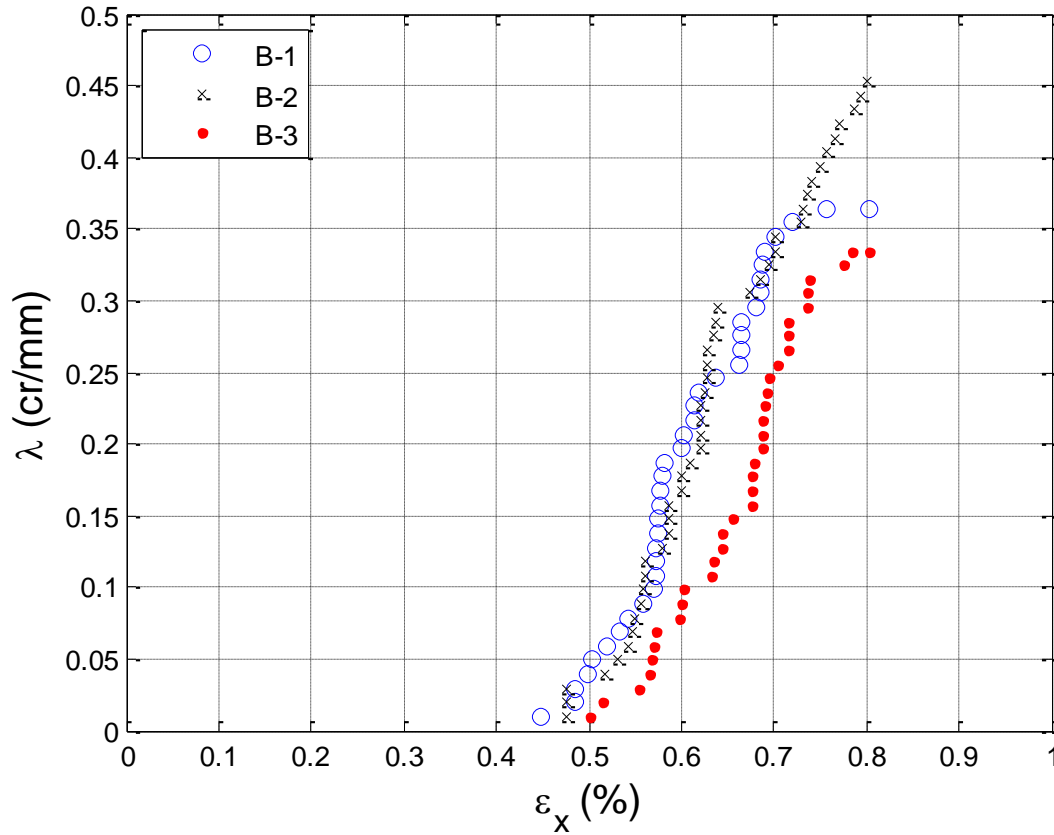


Figura 4.26. Densidad de fisuras frente a deformación para las tres probetas del laminado B $[\pm 25/90_5]_s$

Los resultados mostrados, verificados a través de las radiografías de cada ensayo, apoyan la bondad de los resultados y la validez, a priori, del sistema de emisiones acústicas. Sin embargo, como se comentará más adelante, será necesario evaluar este sistema de AE con más ensayos semejantes.

4.2 Laminados en los que aparece el modo II de fractura

Para analizar el modo II de fractura intralaminar se ha decidido fabricar y ensayar dos laminados (laminado C y laminado D) cuya secuencia de apilamiento es:

$$\text{Laminado C: } [0/\pm 55_4/0_{1/2}]_s \rightarrow [0/+55_4/-55_4/0/-55_4/+55_4/0]$$

Se trata de un laminado compuesto por 19 láminas unidireccionales. Las láminas exteriores y la lámina central están orientadas en la dirección de carga. Cabe destacar que, en este laminado, las fisuras transversales aparecen en dos direcciones diferentes (-55° y $+55^\circ$). Además, las fisuras se pueden formar en cuatro grupos distintos de láminas.

$$\text{Laminado D: } [0/\pm 70_4/0_{1/2}]_s \rightarrow [0/+70_4/-70_4/0/-70_4/+70_4/0]$$

Se trata de un laminado compuesto por 19 láminas unidireccionales. Las láminas exteriores y la lámina central están orientadas en la dirección de carga. Cabe destacar que, en este laminado, las fisuras transversales aparecen en dos direcciones diferentes (-70° y $+70^\circ$). Además, las fisuras se pueden formar en cuatro grupos distintos de láminas.

En ambos laminados la densidad de fisuras se mide para una sola agrupación de láminas, por lo que en este caso, este parámetro se estimará a partir del número de fisuras dividido entre cuatro:

$$\lambda = \frac{n/4}{L} \quad (4.3)$$

siendo n el número de fisuras detectadas en la radiografía o a través del sistema AE, y siendo L la longitud considerada (en este trabajo siempre de 4 pulgadas).

4.2.1 Validación y filtrado de las emisiones acústicas: laminado C

La muestra ensayada para la validación y el filtrado de las emisiones acústicas para el laminado C ha sido la probeta C-1.

En el siguiente gráfico (figura 4.27) se presentan los resultados observados a través de las radiografías obtenidas tras cada etapa.

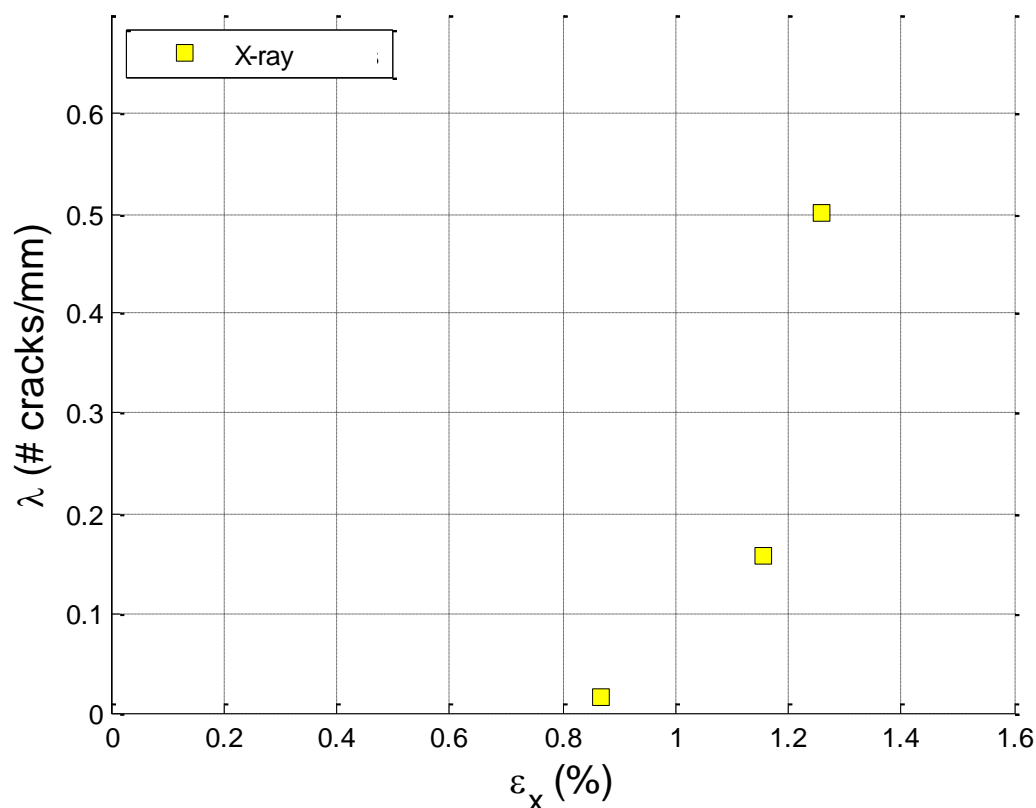


Figura 4.27. Densidad de fisuras frente a deformación longitudinal. Lecturas obtenidas en la radiografía de cada etapa de la probeta C-1

La tabla 4.9 muestra un resumen de las nuevas fisuras obtenidas así como del número de eventos registrados por el sistema de Emisiones Acústicas para cada una de las etapas de deformación de la probeta C-1.

<i><u>Etapas</u></i>	<i><u>Deformación máxima (%)</u></i>	<i><u>Nuevas fisuras en radiografía</u></i>	<i><u>Número de eventos en AE</u></i>
a	0,87	6	22
b	1,15	58	249
c	1,25	140	612

Tabla 4.9. Resumen de los resultados del ensayo C-1 en cada etapa

Primera etapa: $\varepsilon_a = 0,87\%$

Siguiendo el mismo procedimiento que en los laminados A y B, la primera fase consiste en la identificación de las fisuras formadas durante la primera etapa de deformación (figura 4.28).

Es posible ilustrar el desarrollo de las fases del procedimiento de validación para la primera etapa ya que el número de fisuras en la muestra ($n_a^{xray} = 6$) y el número de eventos recogidos por el AE ($n_a^{AE} = 22$) es reducido.

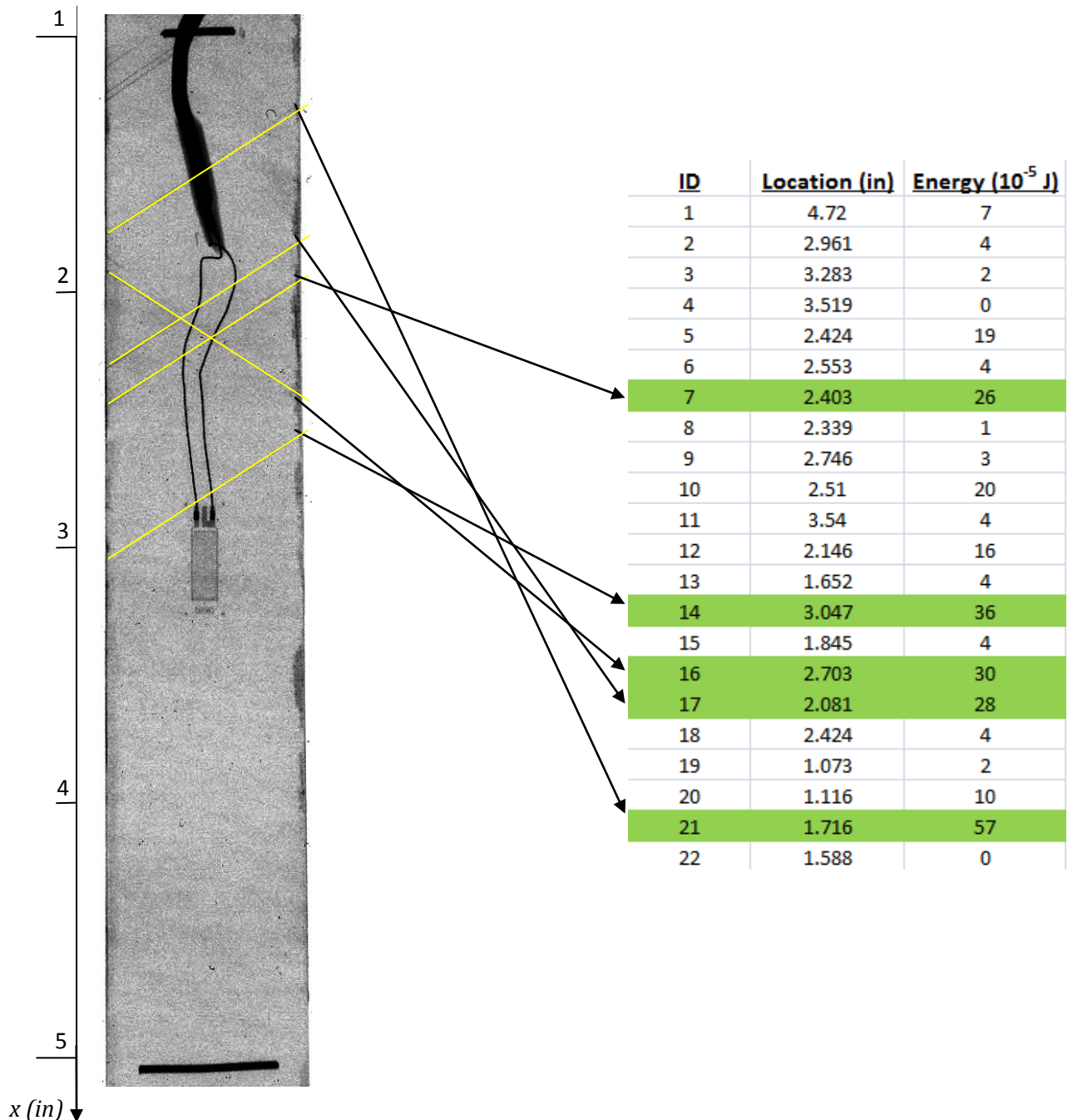


Figura 4.28: Identificación de las fisuras formadas durante la primera etapa (C-1-a) para una deformación de 0,87%. Radiografía obtenida (izquierda) y tabla resumen de resultados obtenidos por AE (derecha)

En la tabla 4.10 se muestran los datos registrados por el AE en la primera etapa de deformación del ensayo (C-1-a).

ID	Rise (μ s)	Counts	Amplitud (dB)	Duration (μ s)	Energy (10^{-5} J)	Average Frequency (kHz)	Centroid Frequency (kHz)	Peak Frequency (kHz)
1	27	29	62	206	7	221	270	244
2	35	36	60	156	4	235	294	458
3	34	12	54	144	2	174	261	243
4	16	2	51	35	0	171	243	244
5	38	57	65	379	19	150	259	185
6	20	39	57	185	4	258	285	187
7	0	6	70	610	26	120	233	169
8	55	9	50	91	1	125	243	179
9	14	34	54	164	3	207	275	169
10	74	58	70	384	20	151	269	108
11	11	6	53	181	4	133	257	187
12	162	56	63	487	16	138	247	125
13	50	22	53	181	4	122	288	427
14	13	90	68	785	36	115	240	187
15	26	19	57	146	4	171	230	186
16	16	95	69	653	30	182	261	170
17	36	74	70	539	28	167	261	170
18	9	1	50	257	4	111	236	138
19	65	6	54	127	2	134	217	179
20	33	34	63	309	10	207	284	125
21	63	103	81	791	57	181	329	426
22	0	3	47	54	0	56	227	186

Tabla 4.10. Resumen de los resultados obtenidos para los eventos registrados por AE en el ensayo C-1-a; se han resaltado los eventos asociados a la formación de fisuras en la muestra

Observaciones:

De esta primera etapa se concluye que la formación de fisuras produce una emisión acústica de amplitud, duración y energía mayor al resto de eventos capturados (figura 4.29). En esta primera etapa se alcanza una deformación relativamente baja, por lo que aún no han tenido lugar otros fenómenos como deslaminaciones o rotura de fibras.

Cabe destacar que el número de fisuras formadas ha sido de 6 y el número de eventos atribuidos a la formación de fisuras ha sido de 5. Es decir, una de las fisuras aparecidas en la radiografía no ha sido detectada por el sistema de emisiones acústicas.

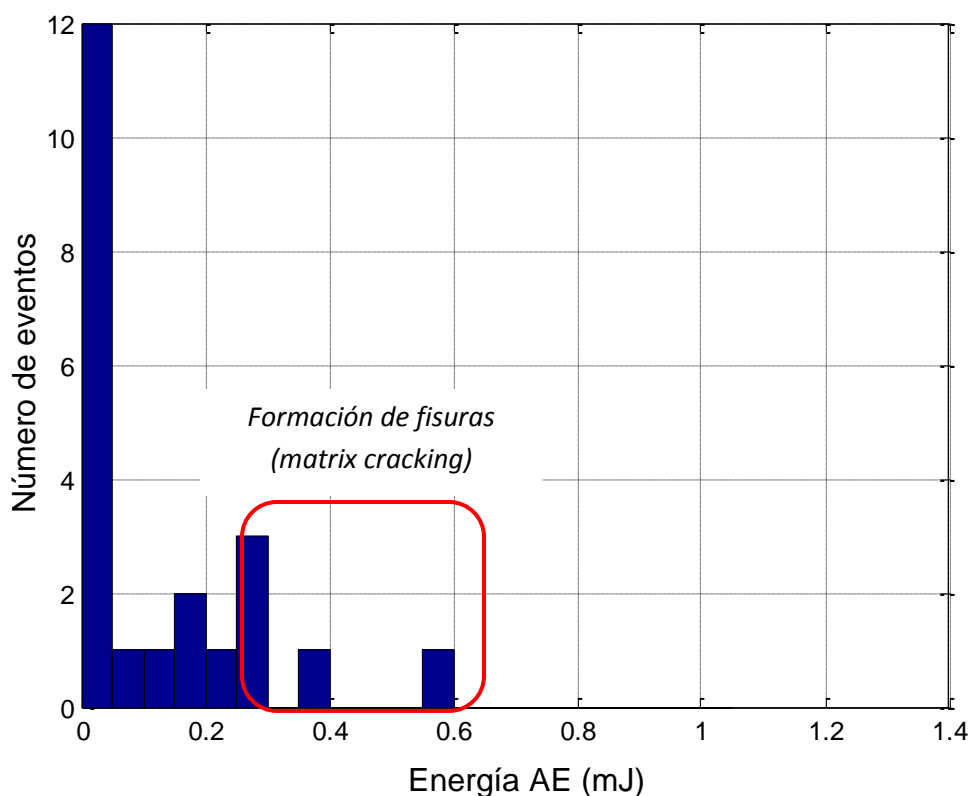


Figura 4.29. Número de eventos frente a energía. Ensayo C-1-a

Segunda etapa: $\varepsilon_a = 1,15\%$

El procedimiento es ejecutado de nuevo para la segunda etapa de deformación. Sin embargo, en esta etapa el número de fisuras en la muestra es muy elevado ($n_b^{xray} = 58$) y el número de eventos registrados por AE es mucho mayor ($n_b^{AE} = 249$). Por ello resulta más laborioso ilustrar directamente la ubicación de las fisuras y su identificación con los eventos de AE, por lo que se muestra directamente la distribución de energía de los eventos registrados.

En la figura 4.30 se observa la radiografía obtenida después de realizar el ensayo para la segunda etapa de deformación (1,15%). El número total de fisuras contabilizado ha sido de 64 (6 de la primera etapa y 58 de la segunda etapa).

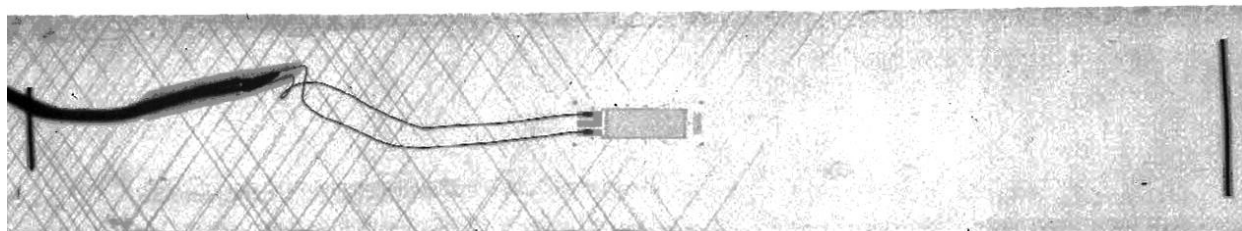


Figura 4.30. Radiografía obtenida de la muestra C-1 con 1,15% de deformación

En el histograma mostrado en la figura 4.31 se han señalado los eventos que corresponden a la formación de fisuras.

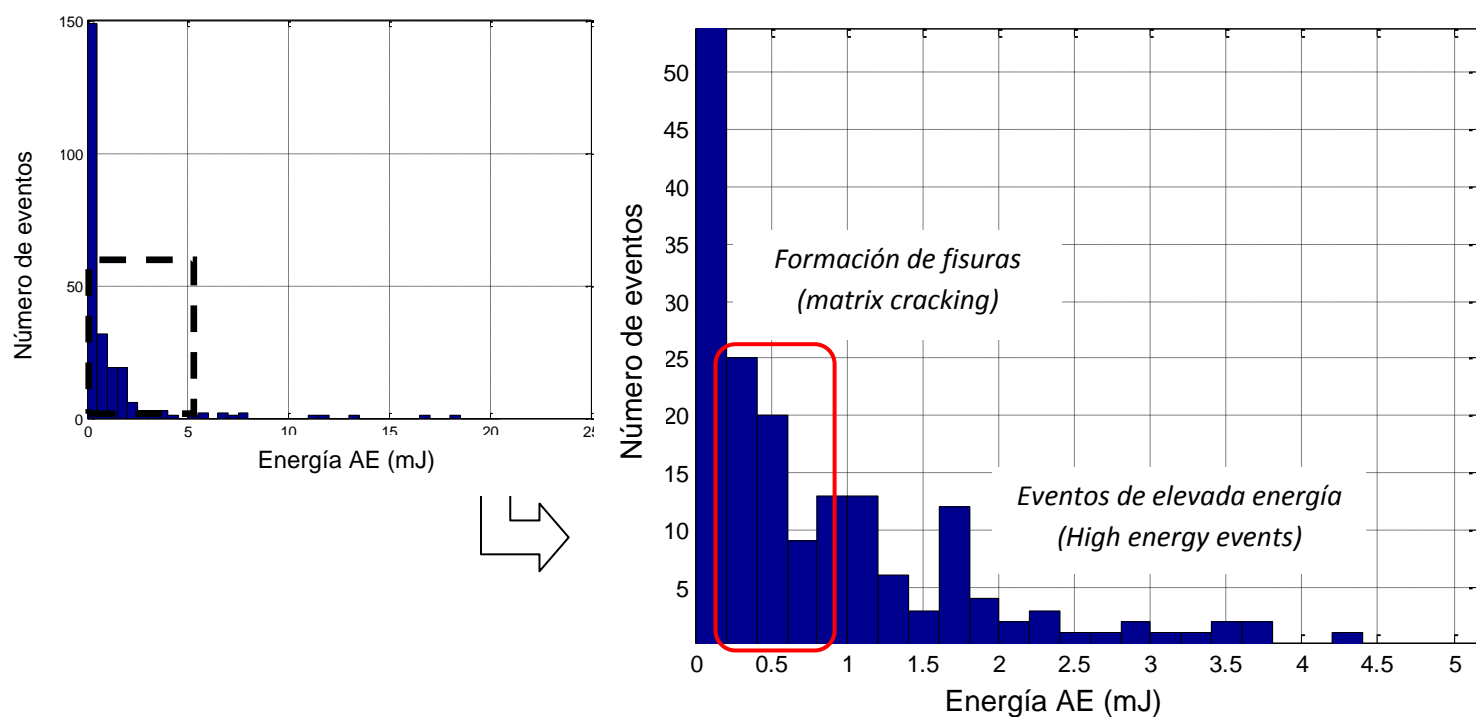


Figura 4.31. Distribución de energía de los eventos registrados durante el ensayo C-1-b y detalle en el rango 0 – 5 mJ

Observaciones:

Se ha comprobado que los eventos atribuidos a la formación de fisuras se encuentran en una región de media energía, en torno a 0,25 – 0,90 mJ. Esto supone una importante diferencia con respecto a los laminados anteriores.

Se han observado 58 nuevas fisuras en la radiografía de esta etapa, de las cuales se han identificado 57 en AE.

Tercera etapa: $\varepsilon_a = 1,25\%$

En la tercera etapa el número de nuevas fisuras ha sido de 140 (n_c^{Xray}) y el número de eventos recogidos por AE ha sido de 612 (n_c^{AE}).

Como sucedía en la etapa anterior, el número de eventos capturados por AE es demasiado elevado para poder ilustrarlo de forma explícita en este informe.

La radiografía obtenida tras esta etapa de deformación se muestra a continuación (figura 4.32). El número total de fisuras contabilizado ha sido de 204 (6 de la primera etapa, 58 de la segunda etapa y 140 de la tercera etapa).

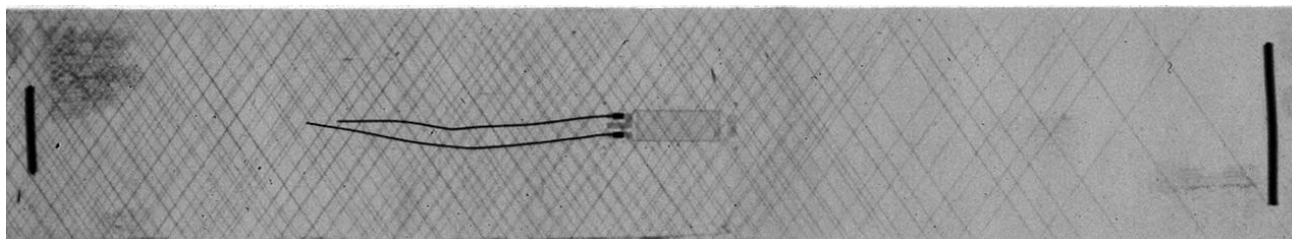


Figura 4.32. Radiografía obtenida de la muestra C-1 con una deformación de 1,25%

En el histograma mostrado en la figura 4.33 se han señalado los eventos que corresponden a la formación de fisuras, así como los eventos relativos a fenómenos con mayor liberación de energía.

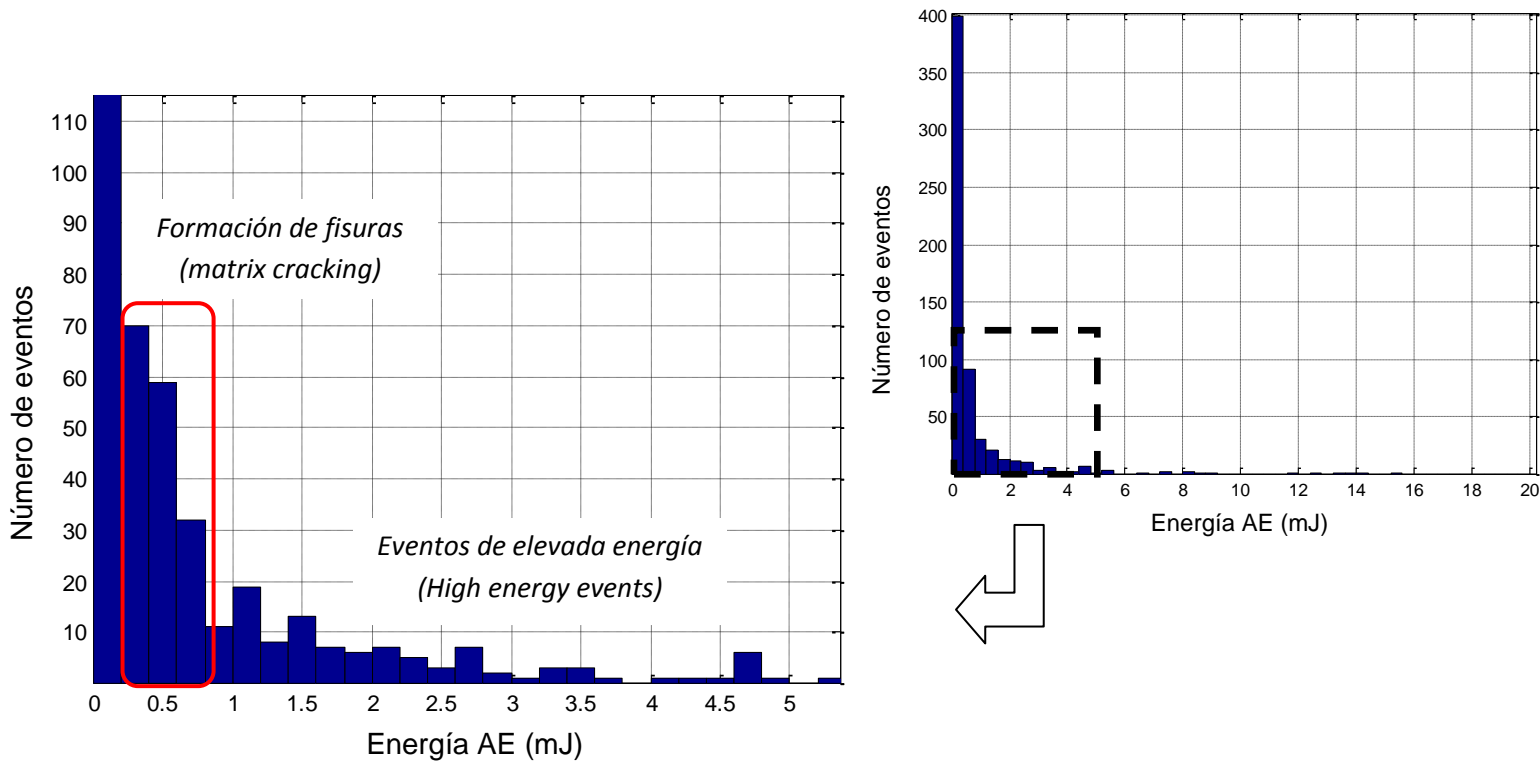


Figura 4.33. Distribución de energía de los eventos capturados en la tercera etapa del ensayo C-1 y detalle en el rango 0-500 (0 – 5 mJ)

Observaciones:

Al igual que sucede en la segunda etapa, en esta última se comprueba que los eventos identificados como aparición de fisuras poseen una energía en el rango de 0,25-0,90 mJ. Los eventos con alta liberación de energía proceden de deslaminaciones, rotura de fibras y reorientación de las láminas hacia la dirección de carga, entre otros fenómenos.

En esta etapa se han identificado mediante el sistema de Emisiones Acústicas (AE) las 140 nuevas fisuras observadas en la radiografía.

Evaluación del ensayo

Al igual que se procedió en los casos anteriores, es posible elaborar un criterio que se adapte con la mayor exactitud a los resultados observados en las radiografías y a los eventos recopilados por AE (figura 4.34).

El criterio que se ha decidido emplear es el del producto de la energía por la amplitud, ya que es el que ha proporcionado la mejor correlación entre fisuras formadas y eventos capturados.

Las cotas seleccionadas han sido 18 y 78 mJ·dB, como límites inferior y superior.

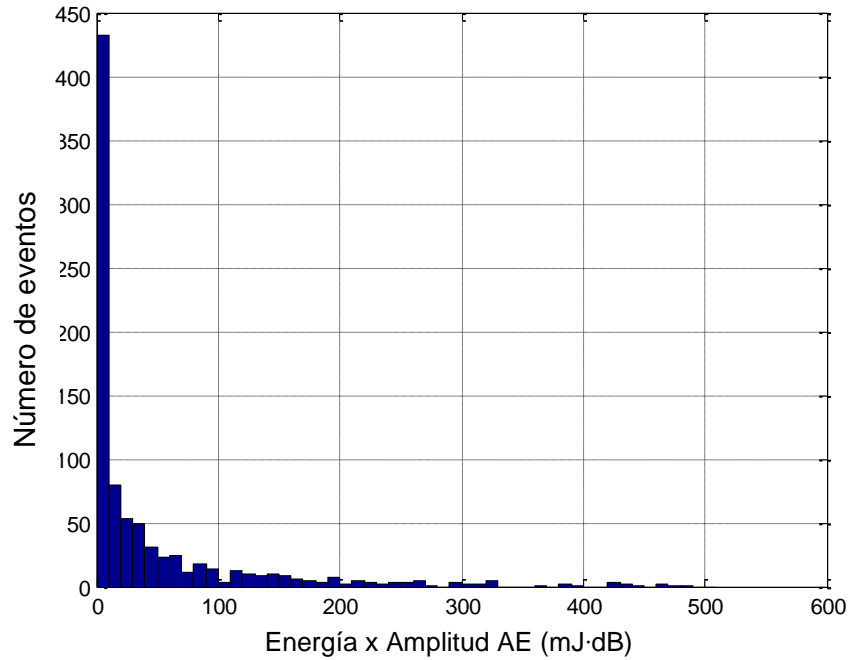


Figura 4.34. Número de eventos frente a Energía x Amplitud durante las tres etapas del ensayo C-1

Los resultados obtenidos aplicando estos valores para el criterio se muestran en la tabla 4.11.

Etap	Fisuras observadas en radiografía	Número de eventos en AE	Fisuras en AE	Eventos por debajo de la cota inferior	Eventos por encima de la cota superior
a	6	22	5	17	0
b	58	249	57	123	69
c	140	612	140	358	114
Final	204	883	202	498	183

Tabla 4.11. Comparación de resultados del criterio aplicado frente a las radiografías

El grado de correspondencia conseguido al emplear este criterio es:

$$c = 100 * \left(1 - \frac{|N_{final}^{Xray} - N_{final}^{AE}|}{N_{final}^{Xray}} \right) \% = 100 * \left(1 - \frac{|204 - 202|}{204} \right) \% = 99,02\% \quad (4.5)$$

En la figura 4.35 se observa la distribución de los eventos captados dentro del criterio aplicado. Las líneas continuas representan la cota superior (hipérbola magenta) y la cota inferior (hipérbola roja).

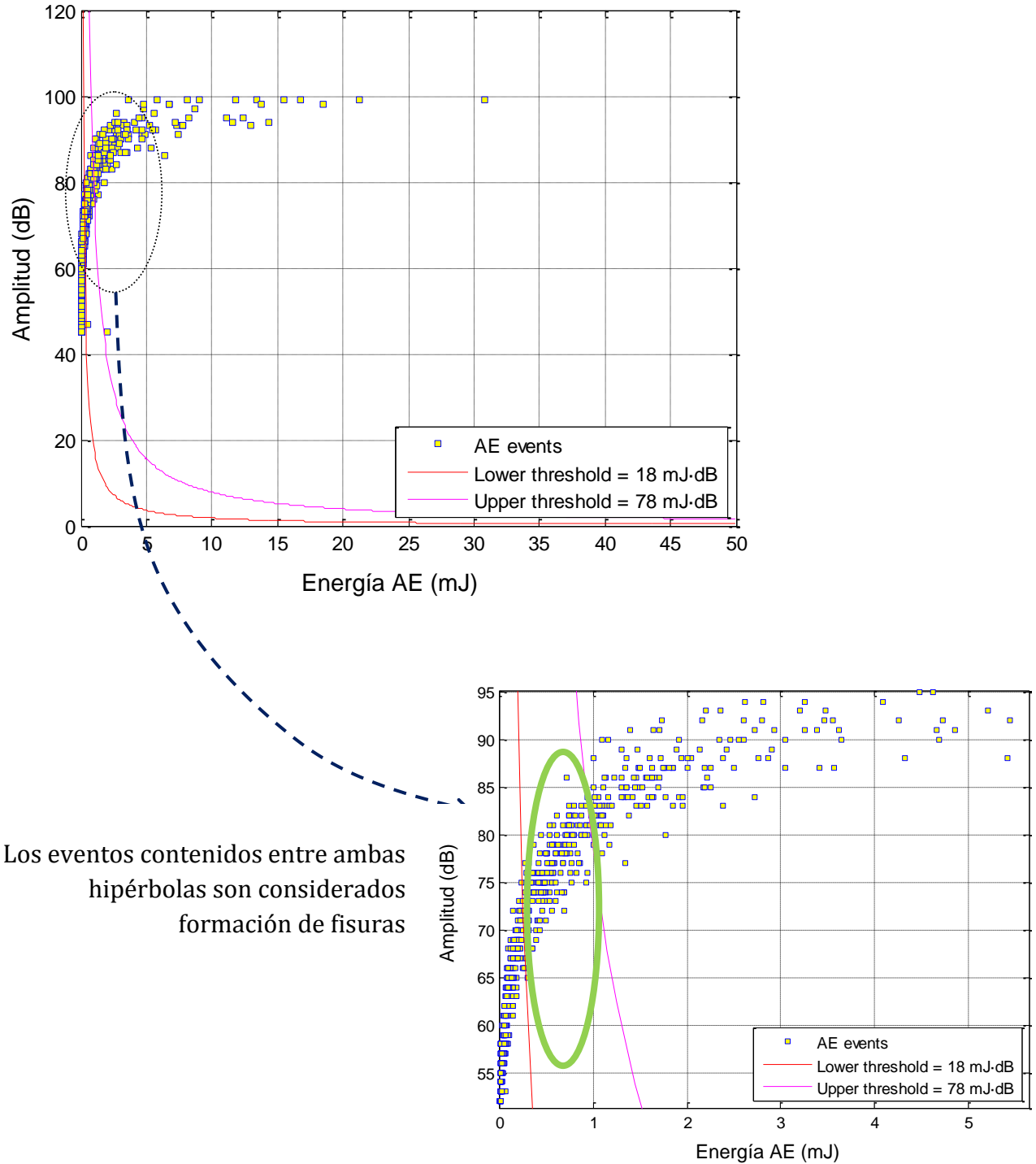


Figura 4.35. Ilustración del criterio aplicado para el laminado C y detalle de la región de interés

En la tabla 4.12 se muestra el grado de correspondencia obtenido entre las radiografías y los eventos filtrados del sistema de Emisiones Acústicas (AE) para cada uno de los criterios.

Cabe destacar que, aunque los resultados no son muy diferentes, el criterio de la energía por la amplitud se aproxima más con los resultados esperados.

El grado de correspondencia utilizando el criterio de la energía es de un 93,1% mientras que el grado de correspondencia utilizando el criterio de la energía por la amplitud es de un 99%. Por esto, se ha decidido utilizar este segundo criterio.

Criterio: energía (0,25 – 0,90 mJ)		Criterio: energía x amplitud (18 – 78 mJ·dB)	
N^{Xray}	$N^{AE} (c)$	N^{Xray}	$N^{AE} (c)$
C-1	204	190 (93,14%)	202 (99,02%)

Tabla 4.12. Comparación de resultados según el criterio empleado para la muestra C-1. Número de fisuras observadas en las radiografías, número de fisuras detectadas por AE y grado de correspondencia

4.2.2 Validación y filtrado de las emisiones acústicas: laminado D

La muestra ensayada para la validación y el filtrado de las emisiones acústicas para el laminado D ha sido la probeta D-1.

En el siguiente gráfico (figura 4.36) se presentan los resultados observados a través de las radiografías obtenidas tras cada etapa.

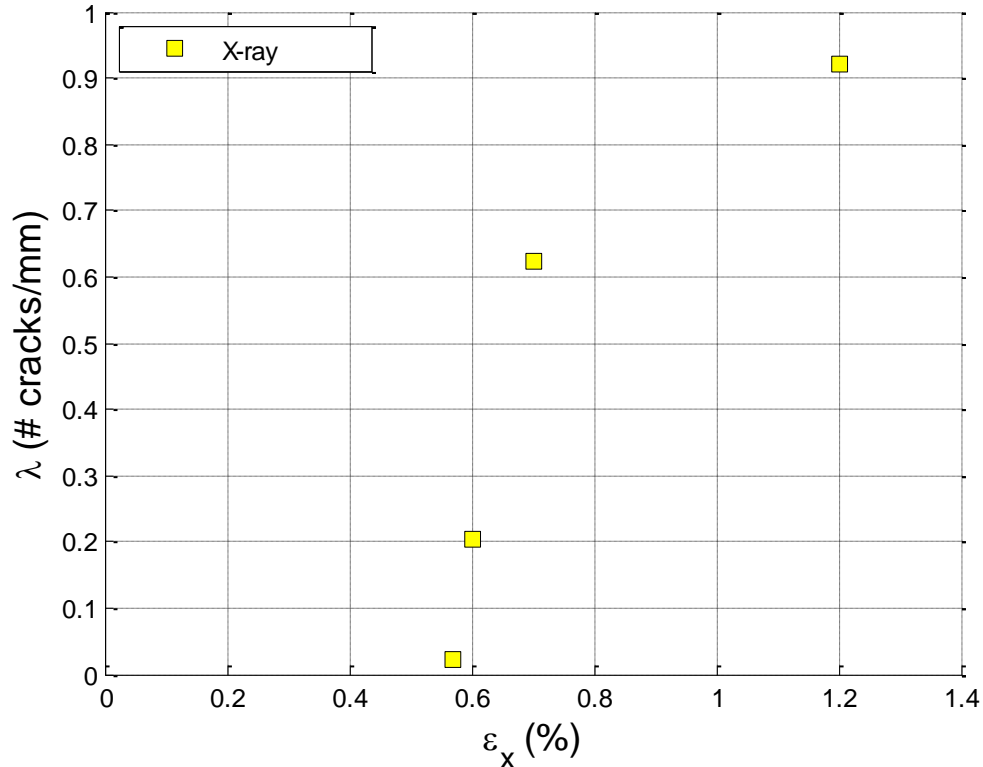


Figura 4.36. Densidad de fisuras frente a deformación longitudinal. Resultados obtenidos de la lectura de las radiografías tras cada etapa para la muestra D-1

A continuación se resumen los resultados obtenidos en cada etapa del ensayo de la muestra D (tabla 4.13). En este caso, se han efectuado 4 etapas de carga debido al elevado número de fisuras obtenido.

<u>Etapas</u>	<u>Deformación máxima (%)</u>	<u>Nuevas fisuras en radiografía</u>	<u>Número de eventos en AE</u>
a	0,57	9	49
b	0,60	74	367
c	0,70	171	869
d	1,20	128	972

Tabla 4.13. Resumen de los resultados del ensayo D-1 en cada etapa

Primera etapa: $\varepsilon_a = 0,57\%$

De forma análoga a los laminados anteriores, la primera fase consiste en la identificación de las fisuras formadas durante la primera etapa de deformación.

Es posible ilustrar el desarrollo de las fases del procedimiento de validación para la primera etapa ya que el número de fisuras en la muestra ($n_a^{xray} = 9$) y el número de eventos recogidos por el AE ($n_a^{AE} = 49$) es reducido (fig 4.37).

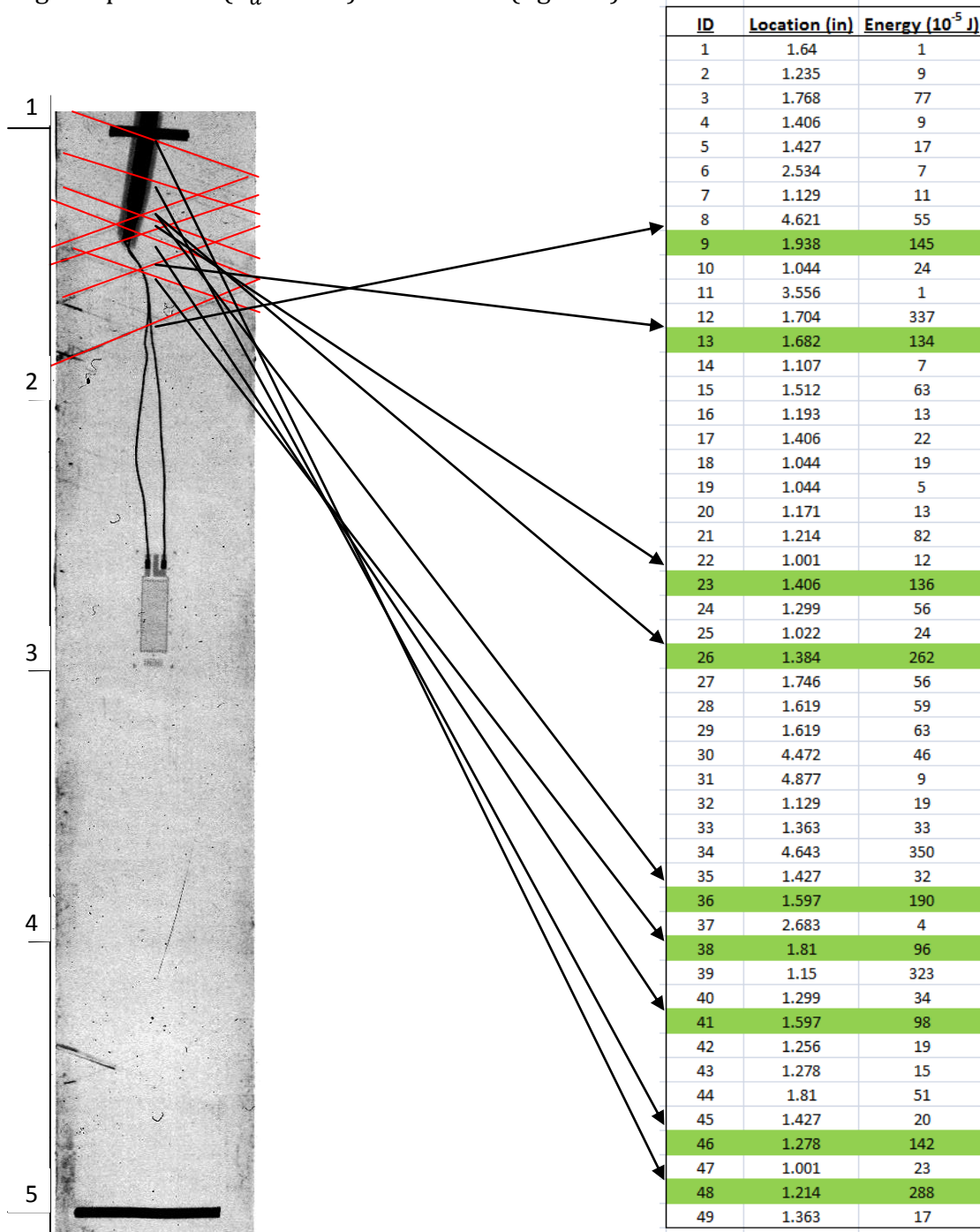


Figura 4.37. Identificación de las fisuras formadas durante la primera etapa (D-1-a) con un 0,57% de deformación. Radiografía obtenida (izquierda) y tabla resumen de resultados obtenidos por AE (derecha)

En la tabla 4.14 se muestran los datos registrados por el sistema de Emisiones Acústicas en la primera etapa de deformación del ensayo (D-1-a).

ID	Rise (μ s)	Counts	Amplitud (dB)	Duration (μ s)	Energy (10^{-5} J)	Average Frequency (kHz)	Centroid Frequency (kHz)	Peak Frequency (kHz)
1	4	4	51	74	1	149	288	184
2	30	25	65	231	9	177	322	117
3	38	56	82	478	77	159	302	118
4	63	26	67	225	9	178	308	188
5	13	39	70	295	17	271	353	417
6	0	22	63	252	7	102	287	187
7	45	26	69	184	11	228	342	470
8	100	55	80	479	55	157	252	188
9	55	73	88	682	145	119	276	185
10	96	37	68	421	24	97	212	116
11	17	5	49	63	1	83	245	186
12	79	99	96	1314	337	114	261	118
13	64	102	90	605	134	172	321	416
14	110	22	64	236	7	182	295	111
15	54	65	82	467	63	194	327	387
16	50	29	66	293	13	160	282	187
17	51	40	76	337	22	269	343	430
18	85	41	68	361	19	199	293	116
19	42	22	63	191	5	316	312	115
20	48	39	70	295	13	216	299	240
21	399	114	81	783	82	201	295	184
22	92	28	70	272	12	173	295	456
23	180	108	85	1041	136	143	277	182
24	56	57	81	458	56	151	326	421
25	55	49	76	501	24	210	338	417
26	120	92	91	982	262	109	227	184
27	57	87	76	477	56	220	294	189
28	63	70	82	467	59	193	319	187
29	69	66	81	482	63	168	282	117
30	53	59	80	716	46	218	339	433
31	23	30	70	209	9	332	329	430
32	50	45	67	470	19	264	320	98
33	58	43	73	397	33	144	264	186
34	80	87	97	1227	350	100	288	187
35	66	58	74	382	32	187	282	188
36	151	85	85	847	190	132	214	110
37	40	9	56	267	4	95	257	152
38	366	107	82	757	96	217	325	431
39	497	143	98	1332	323	136	332	418
40	62	42	72	443	34	119	215	187
41	61	115	78	991	98	139	201	117
42	57	41	73	375	19	231	312	417
43	57	38	73	240	15	217	309	185
44	56	57	80	443	51	169	307	417
45	57	36	68	296	20	159	246	187
46	70	91	88	625	142	154	300	244
47	67	40	71	423	23	246	297	155
48	68	84	95	1095	288	117	314	184
49	57	45	72	325	17	244	303	419

Tabla 4.14. Resumen de los resultados obtenidos para los eventos registrados por AE en el ensayo D-1-a; se han resaltado los eventos asociados a la formación de fisuras en la muestra

Observaciones:

De esta primera etapa se concluye que la formación de fisuras produce una emisión acústica de amplitud, duración y energía mayor al resto de eventos capturados. Sin embargo, existe un conjunto más reducido de eventos cuya energía liberada es aún mayor y podrían identificarse con tensiones interlaminares como consecuencia de la reorientación de las fibras de las láminas dispuestas a $\pm 70^\circ$.

Cabe destacar que el número de fisuras formadas ha sido de 9 y el número de eventos atribuidos a la formación de fisuras ha sido igualmente de 9. Sin embargo, la lectura de la radiografía puede inducir a observar alguna fisura más.

En la figura 4.38 se observa la representación de los eventos recogidos en la primera etapa.

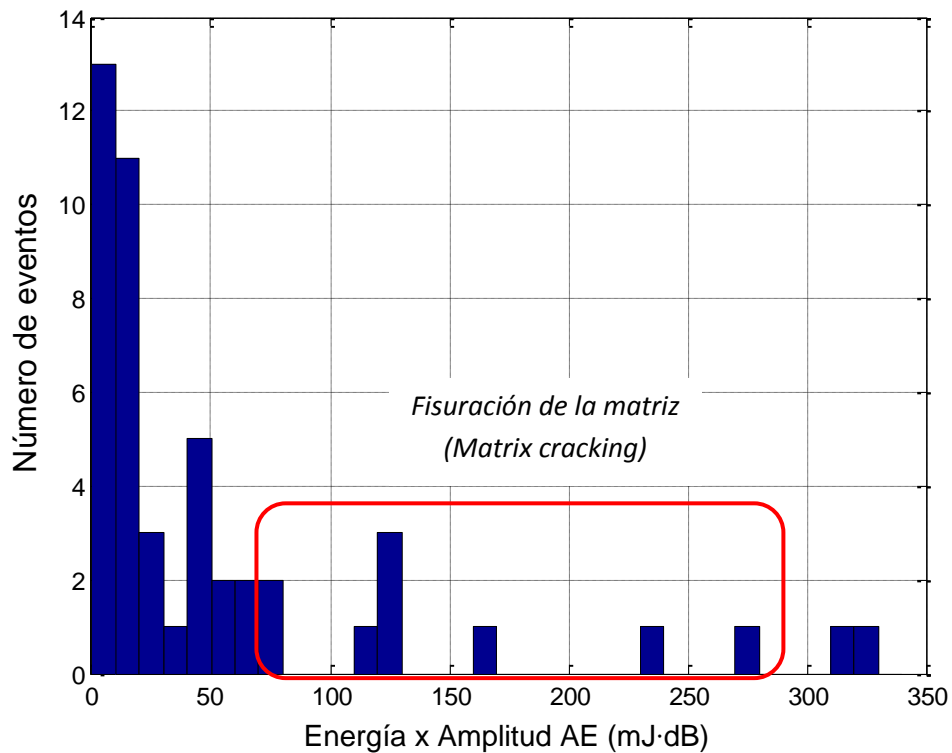


Figura 4.38. Número de eventos frente al producto de energía por amplitud. Ensayo D-1-a

Segunda etapa: $\varepsilon_a = 0,60\%$

El procedimiento es ejecutado de nuevo para la segunda etapa de deformación. Sin embargo, en esta etapa el número de fisuras en la muestra es muy elevado ($n_b^{xray} = 74$) y el número de eventos registrados por AE es mucho mayor ($n_b^{AE} = 367$). Por ello, resulta más laborioso ilustrar directamente la ubicación de las fisuras y su identificación con los eventos de AE, por lo que se muestra directamente la distribución de Energía x Amplitud de los eventos registrados (figura 4.39 y 4.40).

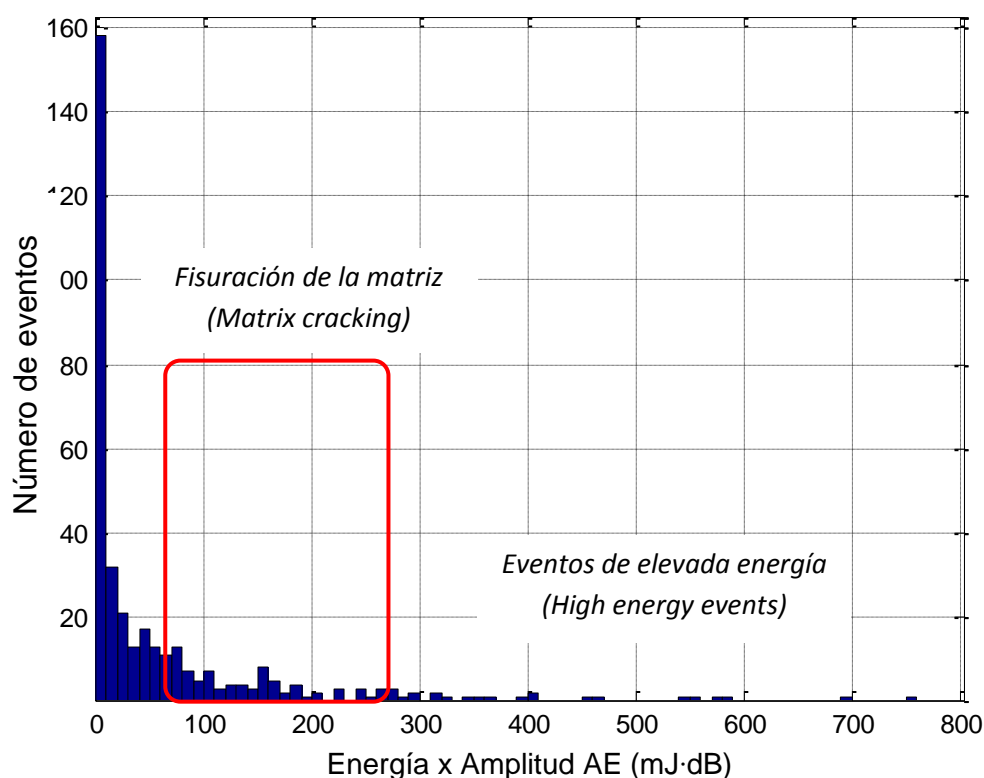


Figura 4.39. Número de eventos frente al producto de energía por amplitud. Ensayo D-1-b

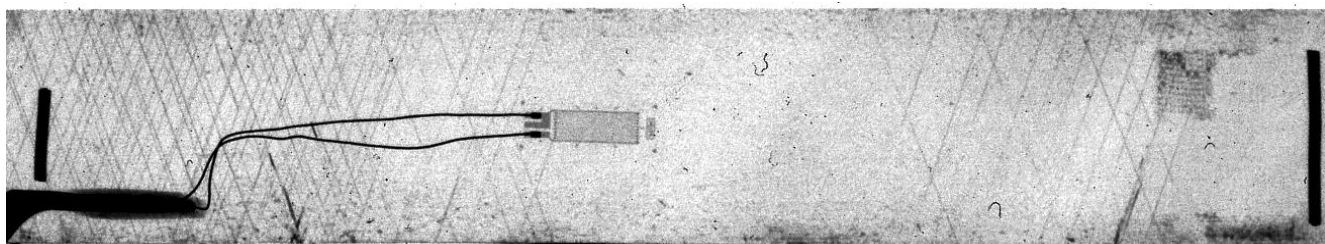


Figura 4.40. Radiografía obtenida tras el ensayo D-1-b con una deformación de 0,60%

Observaciones:

Se ha comprobado que los eventos atribuidos a la formación de fisuras se encuentran en una región de media energía y elevada amplitud, en torno a 70 – 300 mJ·dB. Resulta similar al laminado C, ya que como ocurría en aquel, el modo de fractura es mixto.

Se han observado 74 nuevas fisuras en la radiografía de esta etapa y se han identificado 75 mediante el sistema de Emisiones Acústicas.

Tercera y cuarta etapa: $\varepsilon_c = 0,70\%$ y $\varepsilon_d = 1,20\%$

En la tercera etapa el número de nuevas fisuras ha sido de 171 ($n_c^{Xray} = 171$) y el número de eventos recogidos por AE ha sido de 869 ($n_c^{AE} = 869$). En la cuarta etapa el número de nuevas fisuras ha sido de 120 ($n_c^{Xray} = 120$) y el número de eventos recogidos por AE ha sido de 972 ($n_c^{AE} = 972$).

Las radiografías obtenidas tras la tercera y cuarta etapa se muestran a continuación (figura 4.41):

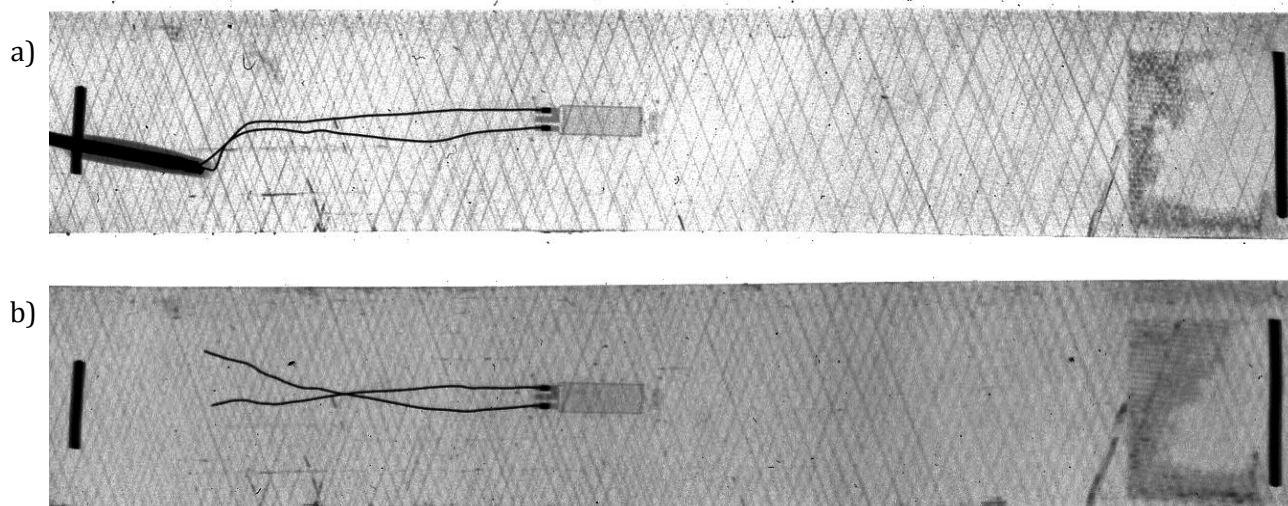


Figura 4.41. Radiografías realizadas tras la tercera (a) y la cuarta etapa (b) con una deformación de 0,7% y 1,20% respectivamente

En el histograma mostrado en la figura 4.42 se han señalado los eventos que corresponden a la formación de fisuras.

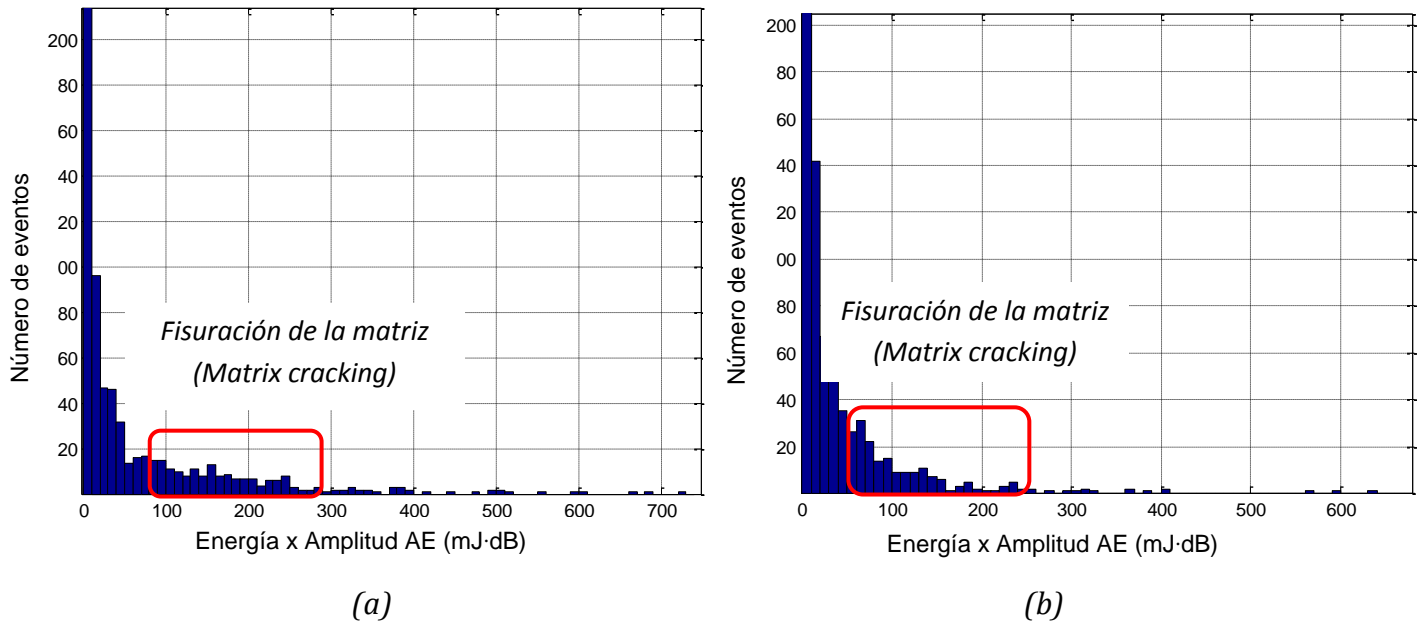


Figura 4.42. Número de eventos frente al producto de energía por amplitud. Ensayo D-1-c (izquierda) y ensayo D-1-d (derecha)

Observaciones:

Al igual que sucede en la segunda etapa, en estas últimas se comprueba que los eventos identificados como aparición de fisuras poseen una energía en el rango de 70 - 300 mJ·dB. Los eventos con alta liberación de energía proceden de deslaminaciones, rotura de fibras y reorientación de las láminas hacia la dirección de carga, entre otros fenómenos.

Se han identificado 167 fisuras en la tercera etapa y 117 fisuras en la cuarta etapa mediante el sistema de Emisiones Acústicas. El número de fisuras obtenidas mediante las radiografías ha sido de 171 para la tercera y 128 para la cuarta.

Evaluación del ensayo

Es posible elaborar un criterio que se adapte con la mayor exactitud a los resultados observados en las radiografías y a los eventos recopilados por AE.

Al igual que en los casos anteriores, el criterio que se ha decidido emplear es el del producto de la energía por la amplitud, ya que es el que ha proporcionado la mejor correlación entre fisuras formadas y eventos capturados.

Las cotas seleccionadas han sido de 75 y 280 mJ·dB, como límites inferior y superior.

Los resultados obtenidos aplicando estos valores se muestran en la tabla 4.15.

Etap	Fisuras observadas en radiografía	Número de eventos en AE	Fisuras en AE	Eventos por debajo de la cota inferior	Eventos por encima de la cota superior
a	9	49	9	37	3
b	74	367	75	271	21
c	171	869	167	659	43
d	128	973	117	843	13
Final	374	2258	368	1810	80

Tabla 4.15. Comparación de resultados del criterio aplicado frente a las radiografías

El grado de correspondencia conseguido al emplear este criterio es:

$$c = 100 * \left(1 - \frac{|N_{final}^{Xray} - N_{final}^{AE}|}{N_{final}^{Xray}} \right) \% = 100 * \left(1 - \frac{|374 - 368|}{374} \right) \% = 98,40\% \quad (4.6)$$

En la figura 4.43 se observa la distribución de los eventos capturados dentro del criterio aplicado. Las líneas continuas representan la cota superior (hipérbola magenta) e inferior (hipérbola roja).

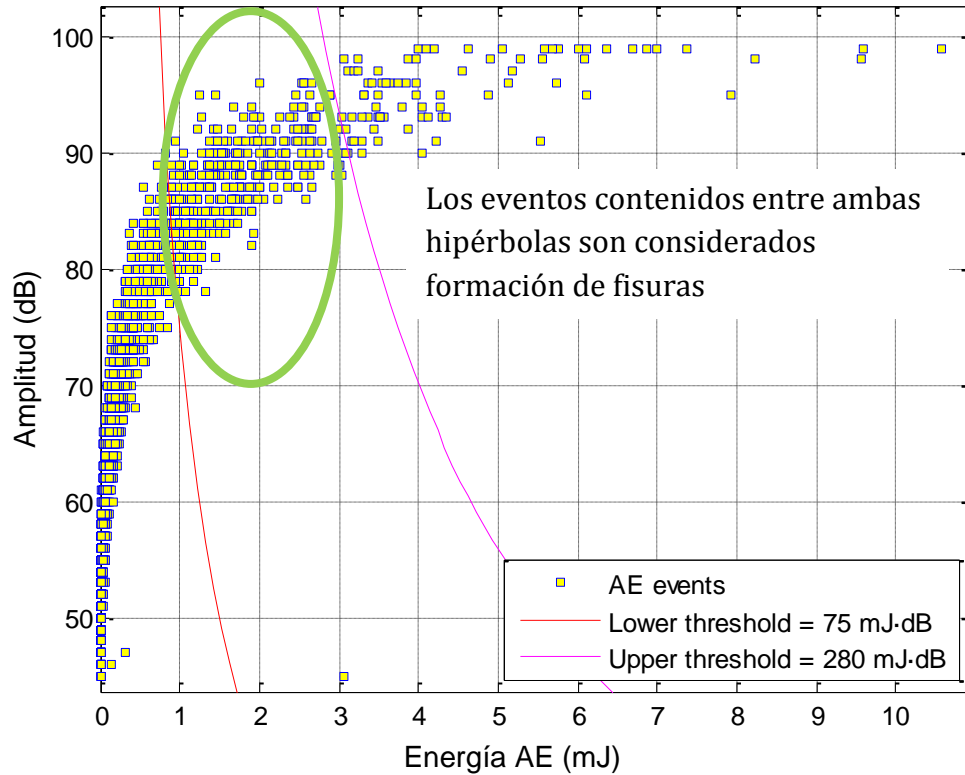


Figura 4.43. Ilustración del criterio aplicado para la probeta D-1

En la tabla 4.16 se observa como el grado de correspondencia utilizando el criterio de la energía es de un 91,7% mientras que el grado de correspondencia utilizando el criterio de la energía por la amplitud es de un 98,4%. Por esto, se ha decidido utilizar este segundo criterio.

	Criterio: energía (0,95 – 3,00 mJ)		Criterio: Energía x Amplitud (75 – 280 mJ-dB)	
	N_{Xray}	$N_{AE} (c)$	N_{Xray}	$N_{AE} (c)$
D-1	374	343 (91,7%)	374	368 (98,4%)

Tabla 4.16. Comparación de resultados según el criterio empleado para la muestra D-1. Número de fisuras observadas en las radiografías, número de fisuras detectadas por AE y grado de correspondencia

Resulta muy representativo que los valores de las cotas superior e inferior sigan una distribución como la que presenta la figura 4.44. Cuanto más próximas a 90° son las láminas, mayor es la energía acústica emitida al producirse una fisura en la matriz.

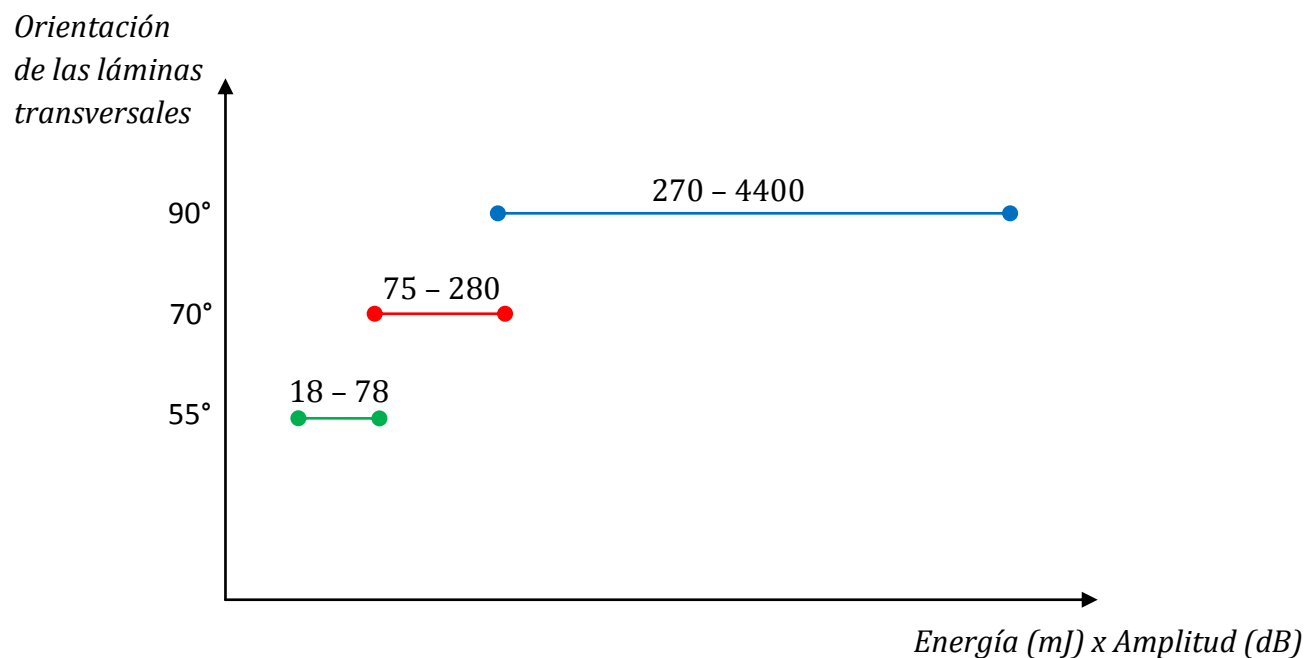


Figura 4.44. Cota inferior y superior para cada uno de los laminados de estudio

4.2.3 Resultados para los laminados C y D

En la tabla 4.17 se resumen los resultados obtenidos para cada uno de los laminados estudiados. Para ambos laminados, la probeta número 1 ha sido ensayada en tres etapas y las probetas 2 y 3 han sido ensayadas sin realizar paradas intermedias.

		Etapas			
		a	b	c	d
C	C-1	6 (0,87%)	58 (1,15%)	140 (1,26%)	-
	C-2	-	-	260 (1,40%)	-
	C-3	-	-	201 (1,43%)	-
D	D-1	9 (0,57%)	74 (0,60%)	171 (0,70%)	128 (1,20%)
	D-2	-	-	200 (0,75%)	250 (1,25%)
	D-3	-	-	-	440 (1,20%)

Tabla 4.17. Resumen de los ensayos realizados para las muestras de los laminados C y D,
 $n_i^{xray}(\varepsilon_{x,max})$

4.2.3.1 Laminado C

El criterio aplicado en esta sección de resultados es el producto de la amplitud por la energía de cada evento. Para el laminado C, la cota inferior es de 18 mJ·dB y la cota superior es de 78 mJ·dB, como se mostraba en el apartado anterior.

Una vez analizados los eventos y descartados aquellos que no corresponden a la formación de fisuras, se representa la densidad de fisuras frente a la deformación longitudinal (ε_x) para la muestra C-1.

En la figura 4.45 se observa que un cierto número de fisuras aparecidas durante la tercera etapa han tenido lugar con una deformación perteneciente a la segunda etapa, entre 0,90 y 1,15%. Ésta es la razón por la que la curva no pasa por el segundo punto obtenido con las radiografías.

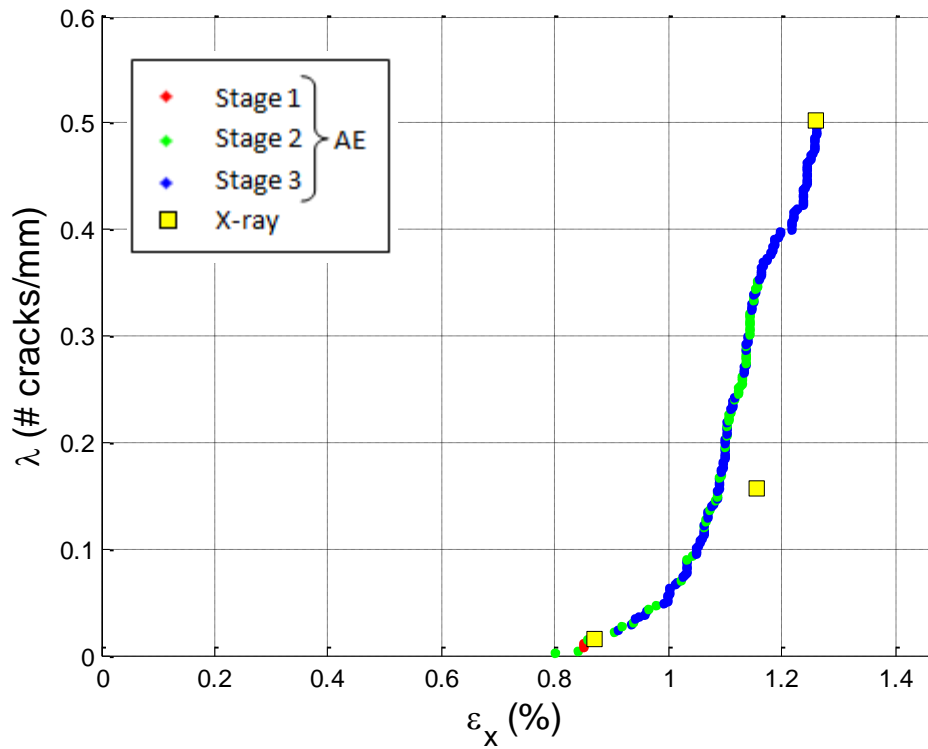


Figura 4.45. Densidad de fisuras frente a deformación. Probeta C-1

Se han ensayado dos probetas más del laminado C: C-2 y C-3. En este caso las muestras se han llevado hasta deformaciones máximas de 1,30% y 1,40%, en una sola etapa. Como en los casos previos, se ha realizado una radiografía de cada una de ellas a modo de comprobación.

En la figura 4.46 se ha representado el registro filtrado de las señales del AE (círculos azules) y la densidad de fisuras medida en la radiografía al final del ensayo (cuadrados amarillos).

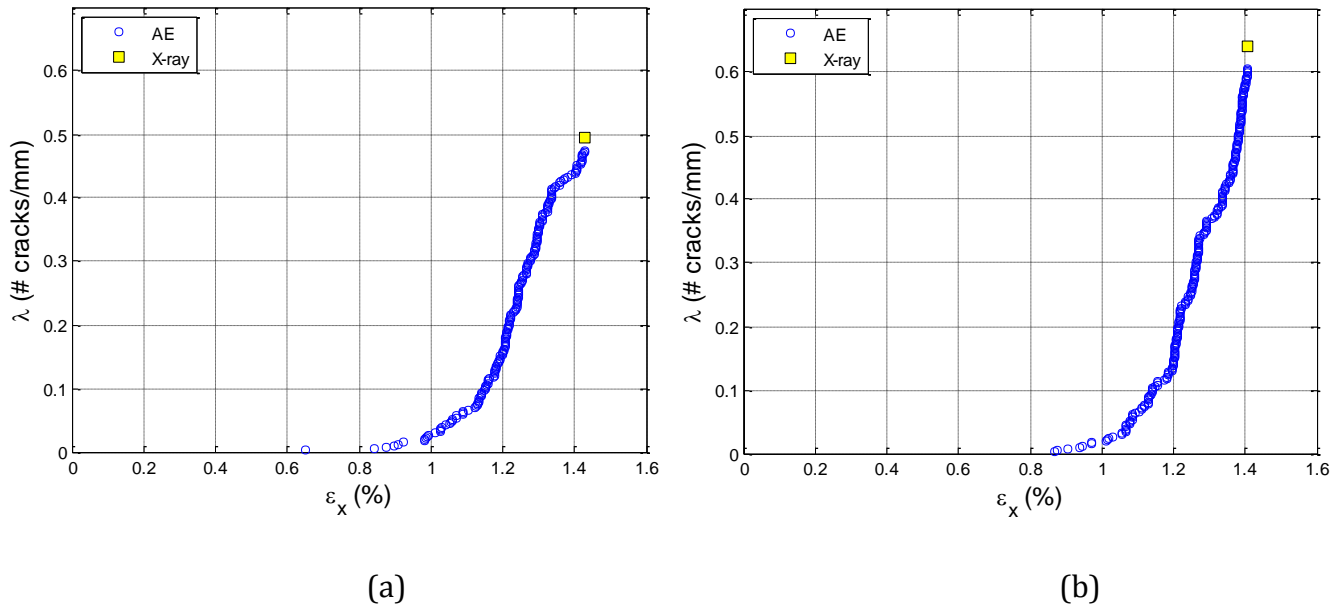


Figura 4.46. Densidad de fisuras frente a deformación. Probetas C-2 (a) y C-3 (b)

Se observa una buena correspondencia final entre los resultados aportados por el sistema de AE y los resultados observados en la radiografía (figura 4.47).

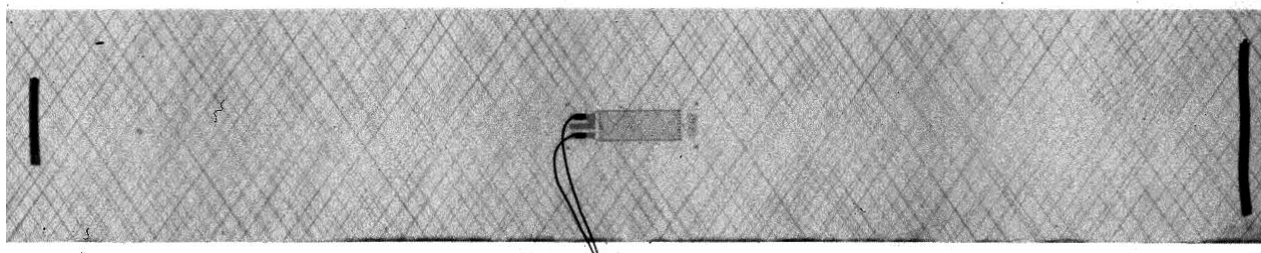


Figura 4.47. Radiografía de la muestra C-3 con una deformación de 1,40%

Por último, se ha realizado una comparación entre los resultados obtenidos en los tres ensayos con el laminado C. Con ello, se comprueba la similitud de los resultados (figura 4.48).

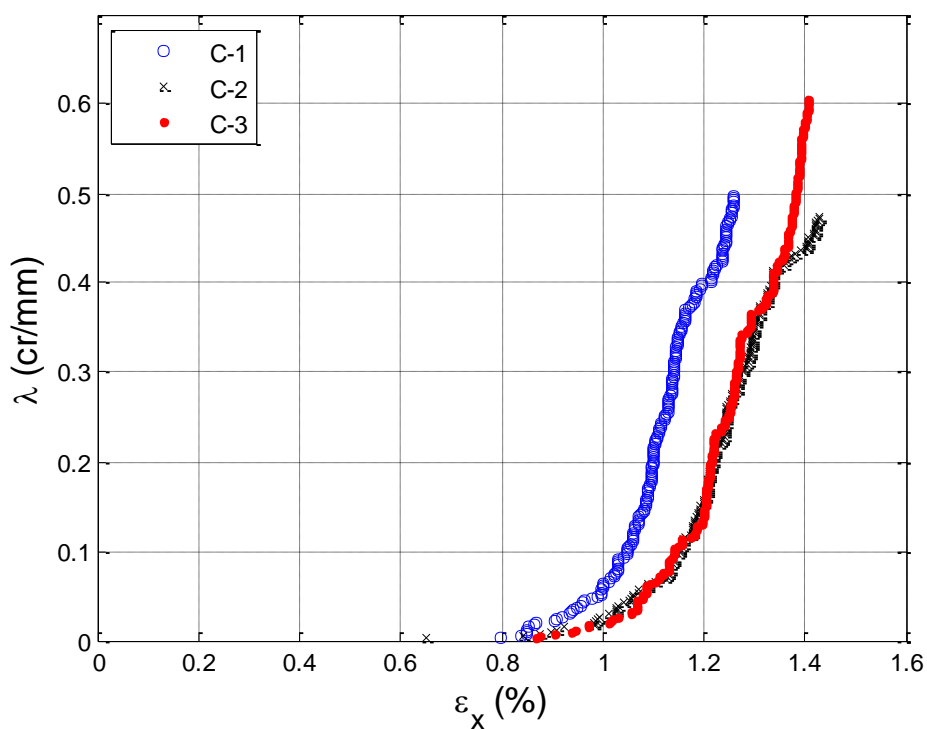


Figura 4.48. Densidad de fisuras frente a deformación para las tres probetas del laminado C $[0/\pm 55_4/0_{1/2}]_s$

4.2.3.2 Laminado D

Como se ha mostrado previamente, el criterio aplicado para este laminado es el producto de la amplitud por la energía de cada evento. La cota inferior es de 75 mJ·dB y la cota superior es de 280 mJ·dB.

Una vez analizados los eventos y descartados aquellos que no corresponden a la formación de fisuras, se representa la densidad de fisuras para la muestra D-1 (figura 4.49).

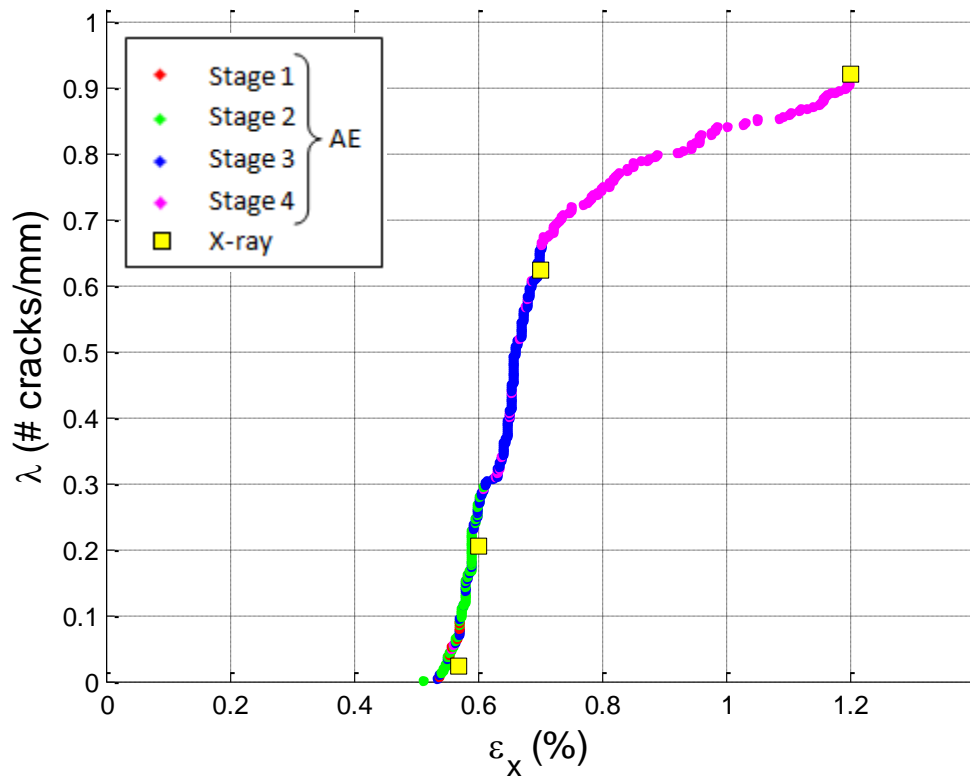


Figura 4.49. Densidad de fisuras frente a deformación. Probeta D-1

Se han ensayado dos probetas más del laminado D: D-2 y D-3. La muestra D-2 se ha llevado hasta una deformación de 1,25% en dos etapas, mientras que la probeta D-3 ha sido sometida a una deformación máxima de 1,20% en una sola etapa. Como en los casos previos, se han tomado radiografías de cada una de ellas a modo de comprobación adicional (figura 4.51).

En la figura 4.50 se ha representado el registro filtrado de las señales del AE (círculos azules) y la densidad de fisuras medida en la radiografía al final del ensayo (cuadrados amarillos). Se observa una buena correspondencia final entre los resultados aportados por el sistema de AE y los resultados observados en la radiografía (figura 4.51).

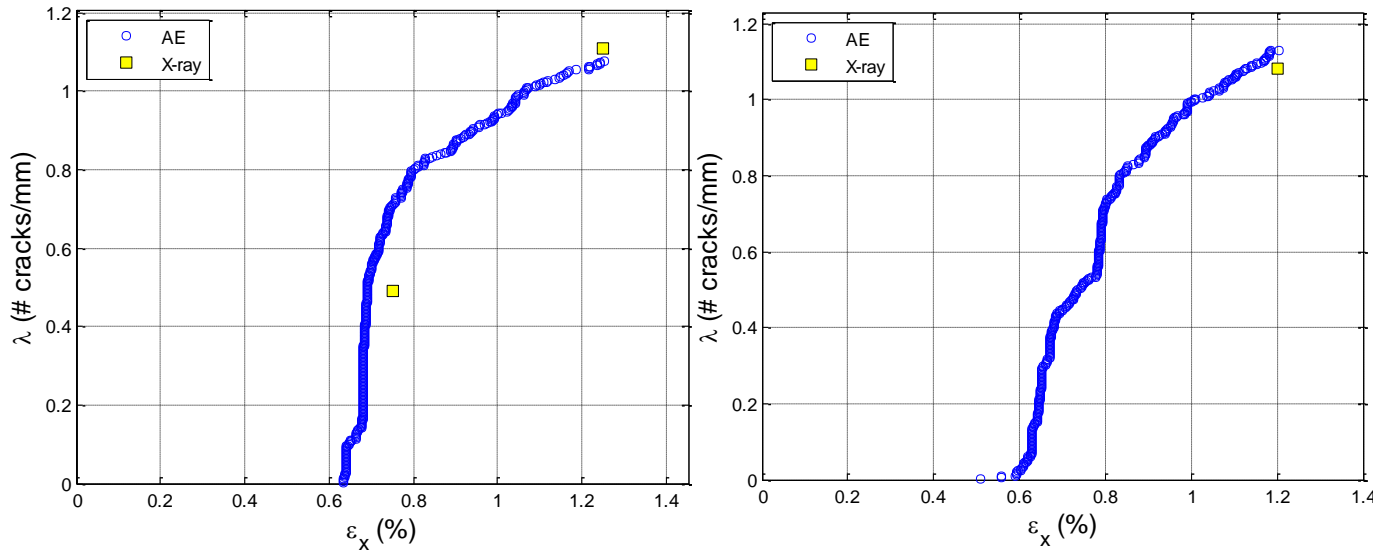


Figura 4.50. Densidad de fisuras frente a deformación. Probetas D-2 (a) y D-3 (b)

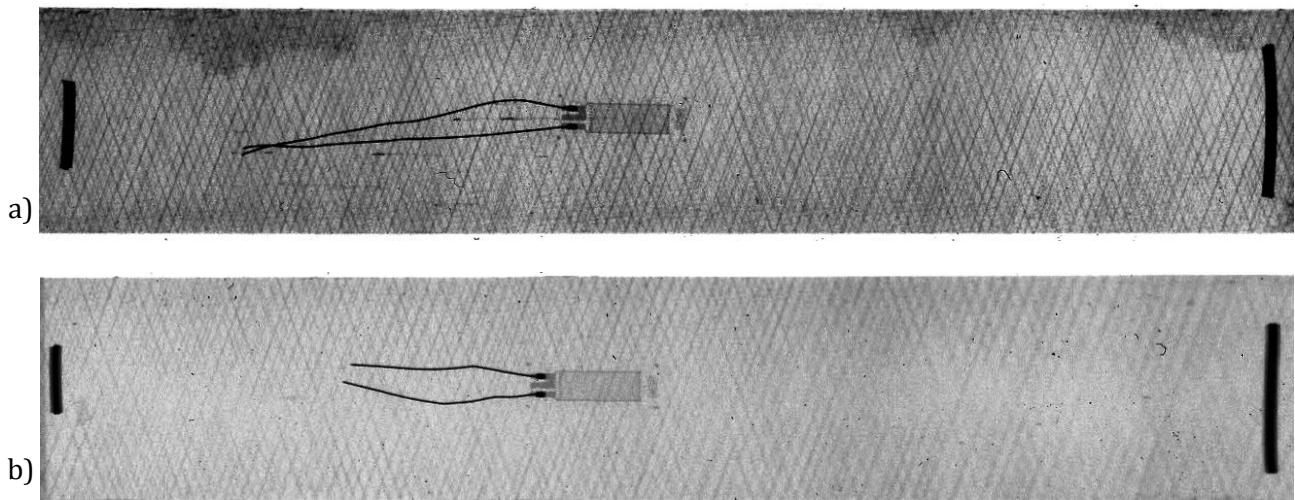


Figura 4.51. Radiografías de las muestras D-2 (a) con un 1,25% de deformación y D-3 (b) con un 1,20% de deformación

Por último, se han comparado los resultados obtenidos de las tres probetas ensayadas del laminado D. El gráfico (figura 4.52) muestra un comportamiento similar en todas las muestras. El nivel de deformación en el que se inicia la aparición de fisuras es muy próximo en todos ellos: 0,55 – 0,60%.

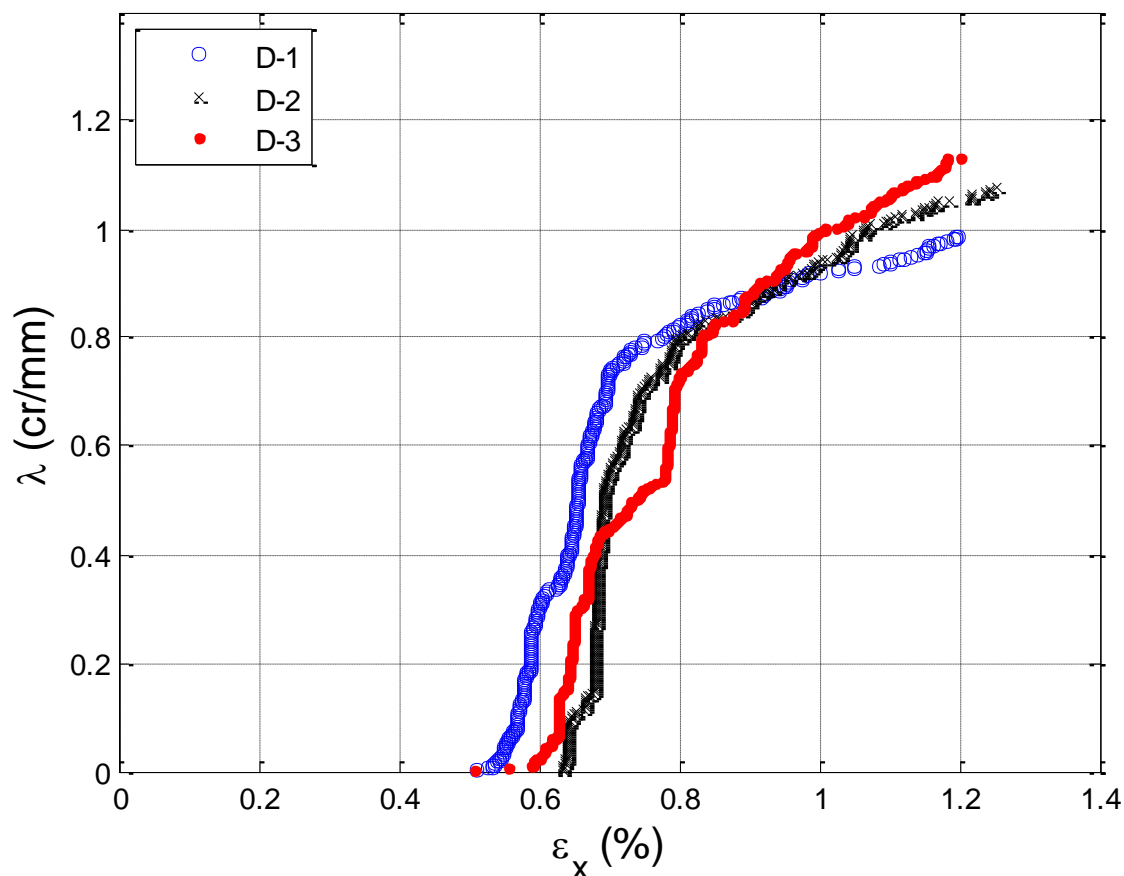


Figura 4.52. Densidad de fisuras frente a deformación de las tres probetas ensayadas para el laminado D $[0/\pm 70_4/0_{1/2}]_s$

En resumen, a la vista de los resultados se puede afirmar que el sistema de Emisiones Acústicas estudiado es válido para la detección de fisuras en la matriz de un laminado de material compuesto.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

5.1 Resumen y conclusiones

En este proyecto se pretende validar un sistema de Emisiones Acústicas (AE) para su utilización en la detección de fisuras transversales en la matriz de un material compuesto.

Hasta el momento, para detectar fisuras en la matriz de un material compuesto era necesaria la extracción de la muestra de la máquina universal de ensayos cada vez que se quería contabilizar el número de nuevas fisuras sobre la probeta. Esto era debido a la necesidad de impregnar la muestra con un líquido penetrante para su posterior introducción en una máquina de rayos-X.

Mediante el sistema de Emisiones Acústicas empleado, no es necesaria la periódica extracción de dicha probeta, ya que el sistema registra el número de fisuras que aparecen en la misma en tiempo real.

Para poder utilizar este sistema AE es necesario realizar un filtrado de los eventos registrados por el mismo para establecer unas cotas que permitan diferenciar la formación de fisuras en la matriz de la rotura de fibras, la deslaminación u otros fenómenos. Por esto, ha sido necesario utilizar una máquina de rayos-X, para verificar y validar los resultados obtenidos por el sistema de Emisiones Acústicas.

La conclusión obtenida de los diferentes ensayos refleja que el filtrado realizado en el sistema AE se corresponde de forma muy aproximada con los resultados obtenidos con las radiografías. Por tanto, se puede afirmar que el sistema podrá ser usado en el futuro para detectar fisuras transversales en la matriz de un material compuesto sin necesidad de usar una máquina de rayos-X.

También cabe destacar que los rangos de energía necesarios para el filtrado de las emisiones acústicas son más elevados cuanto mayor es la intervención del modo I de fractura.

Otra conclusión obtenida de este trabajo tiene que ver con el efecto de localización de las fisuras en las muestras. En las primeras etapas de carga, cuando el número de fisuras es todavía pequeño, se observa que la mayoría de ellas aparecen en la misma zona. Esto se debe a que cuando la densidad de fisuras aumenta, la rigidez disminuye y aumenta la deformación, aumentando nuevamente la densidad de fisuras.

Por último, es necesario mencionar el comportamiento viscoelástico del material en los resultados registrados. En un principio, los ensayos fueron realizados con una velocidad de carga 10 veces mayor. En estos casos, los resultados obtenidos con las probetas en las que se realizaban paradas y los resultados obtenidos con las probetas ensayadas en una sola etapa de carga mostraban un comportamiento diferente. Por esto, se decidió disminuir la velocidad de carga desde 0,05 in/min hasta 0,005 in/min, para reducir el efecto viscoelástico y con ello las diferencias entre los ensayos en una etapa y en varias etapas. Por esto, se concluye que la relajación del material cuando es extraído de la máquina tiene un efecto en los resultados que es necesario considerar.

5.2 Trabajos Futuros

Este proyecto abre dos campos de investigación. Por un lado se encuentran los trabajos enfocados al empleo de sistemas de Emisiones Acústicas y por otro lado la profundización en el proceso de fabricación del material empleado.

Las investigaciones propuestas en relación al sistema de Emisiones Acústicas son:

- La realización de más ensayos utilizando otros laminados con diferentes secuencias de apilamiento y diferente espesor del conjunto de láminas que presentan fisuración de la matriz. Con ello, se podría estudiar la posibilidad de predecir las cotas con las que filtrar los eventos asociados a la formación de fisuras sin necesidad de elaborar una calibración previa. De esta forma, se podría encontrar una correlación entre la configuración del laminado (espesor y orientación de las láminas) y los valores de energía y amplitud esperados al generarse una fisura.
- El desarrollo de una metodología para determinar la identificación espacial de las fisuras en el material de forma exacta.
- Estudiar la posibilidad de establecer esta metodología de emisiones acústicas como procedimiento de inspección no destructiva en laminados de material compuesto.

En cuanto a la fabricación del material compuesto, se puede estudiar:

- El efecto que tiene sobre los resultados la aplicación de una precompresión (debulking) como etapa intermedia para mejorar la adhesión de las láminas entre sí.
- La diferencia en las propiedades obtenidas mediante la fabricación del material utilizando un horno convencional para su curado o utilizando un autoclave.

Anexo: Radiografías

En esta sección se recogen todas las radiografías realizadas para la validación de la detección de fisuras mediante el sistema de Emisiones Acústicas.

En las siguientes páginas se recogen las radiografías obtenidas en cada ensayo para cada uno de los cuatro laminados fabricados.

Laminado	Probeta	Etapas del ensayo	Figura
A	A-1	3	Anexo.1
	A-2	1	Anexo.2
	A-3	1	Anexo.2
B	B-1	3	Anexo.3
	B-2	1	Anexo.4
	B-3	1	Anexo.4
C	C-1	3	Anexo.5
	C-2	1	Anexo.6
	C-3	1	Anexo.6
D	D-1	4	Anexo.7
	D-2	2	Anexo.8
	D-3	1	Anexo.8

Tabla Anexo.1. Relación de radiografías presentadas

Laminado A

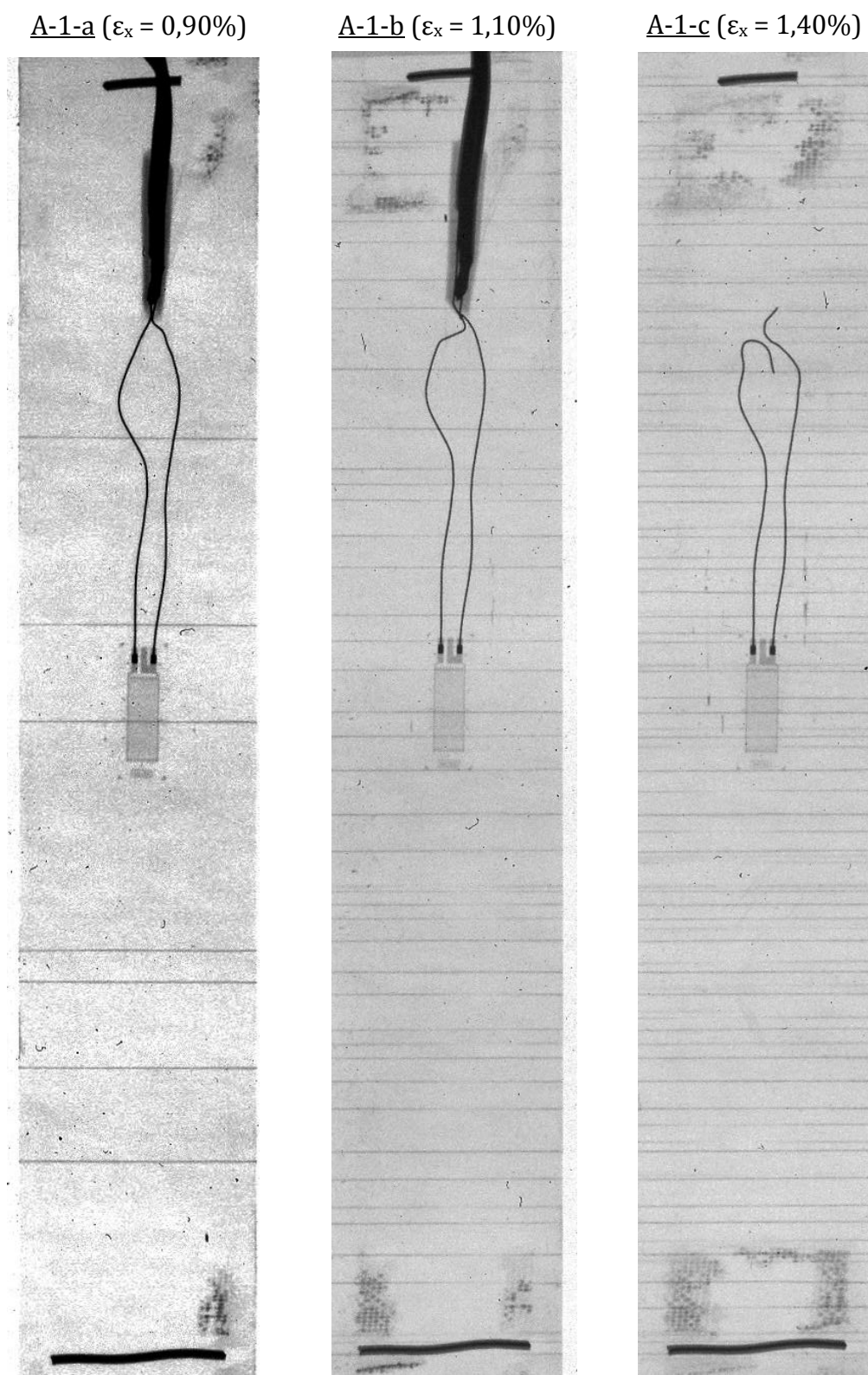
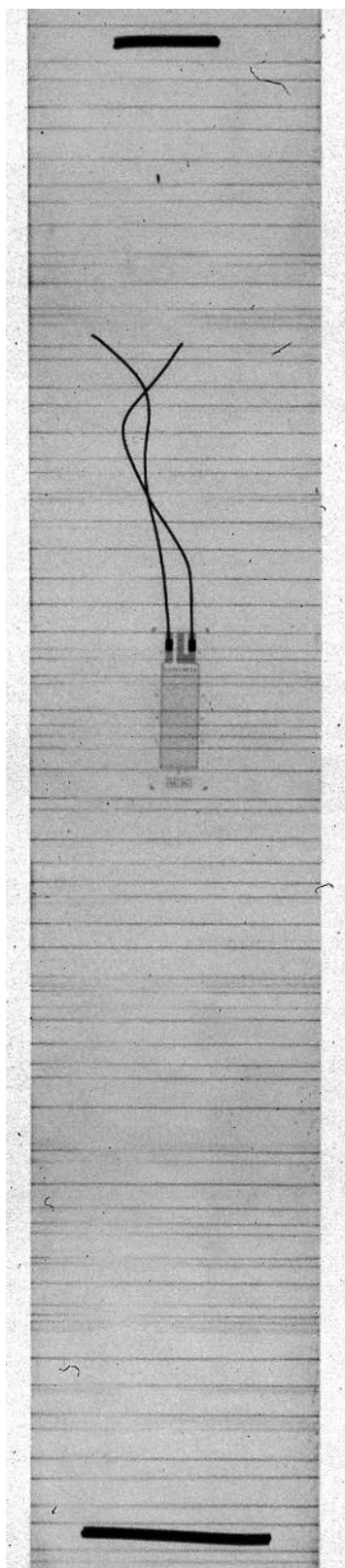


Figura Anexo.1. Radiografías realizadas tras cada etapa durante el ensayo A-1

Ensayo A-2 ($\epsilon_x = 1,40\%$)



Ensayo A-3 ($\epsilon_x = 1,40\%$)

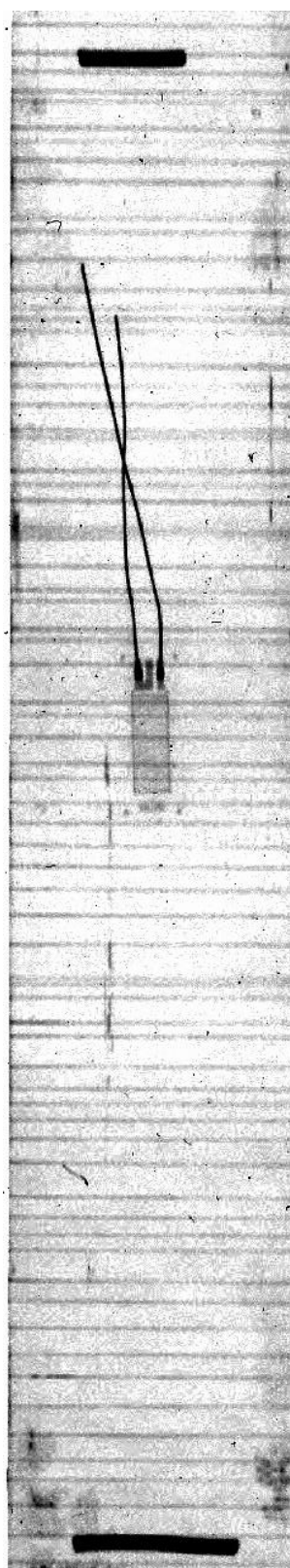
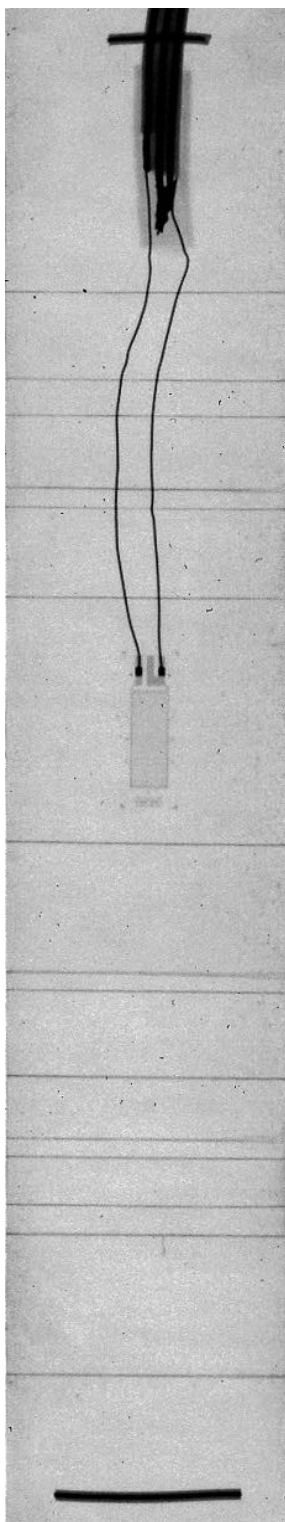


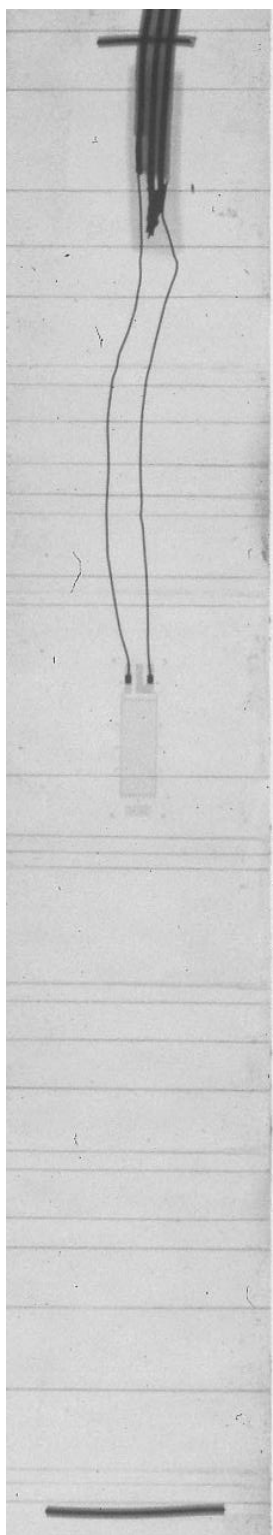
Figura Anexo.2. Radiografías realizadas tras los ensayos A-2 (izquierda) y A-3 (derecha)

Laminado B

B-1-a ($\epsilon_x = 0,60\%$)



B-1-b ($\epsilon_x = 0,70\%$)



B-1-c ($\epsilon_x = 0,80\%$)

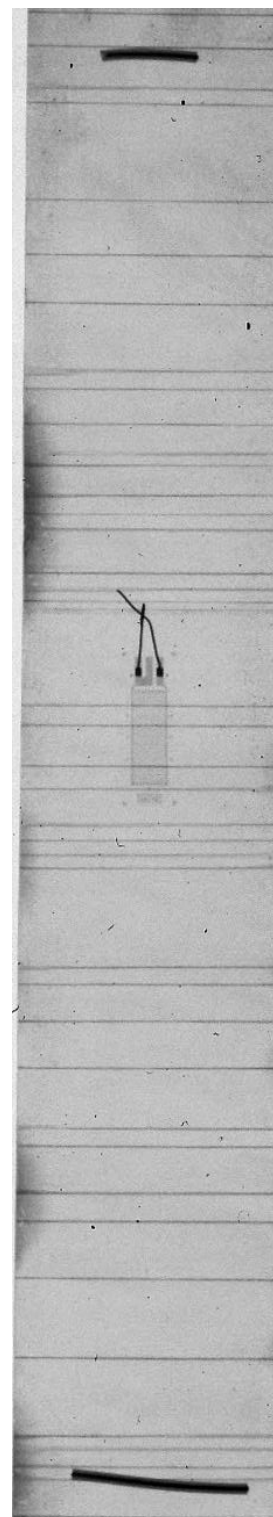


Figura Anexo.3. Radiografías realizadas tras cada etapa durante el ensayo B-1

Ensayo B-2 ($\epsilon_x = 0,80\%$)



Ensayo B-3 ($\epsilon_x = 0,80\%$)

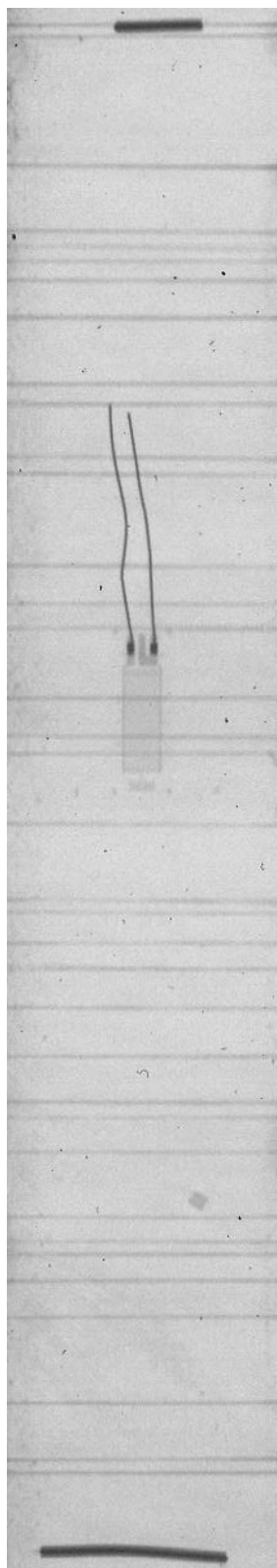


Figura Anexo.4. Radiografías realizadas tras los ensayos B-2 (izquierda) y B-3 (derecha)

Laminado C

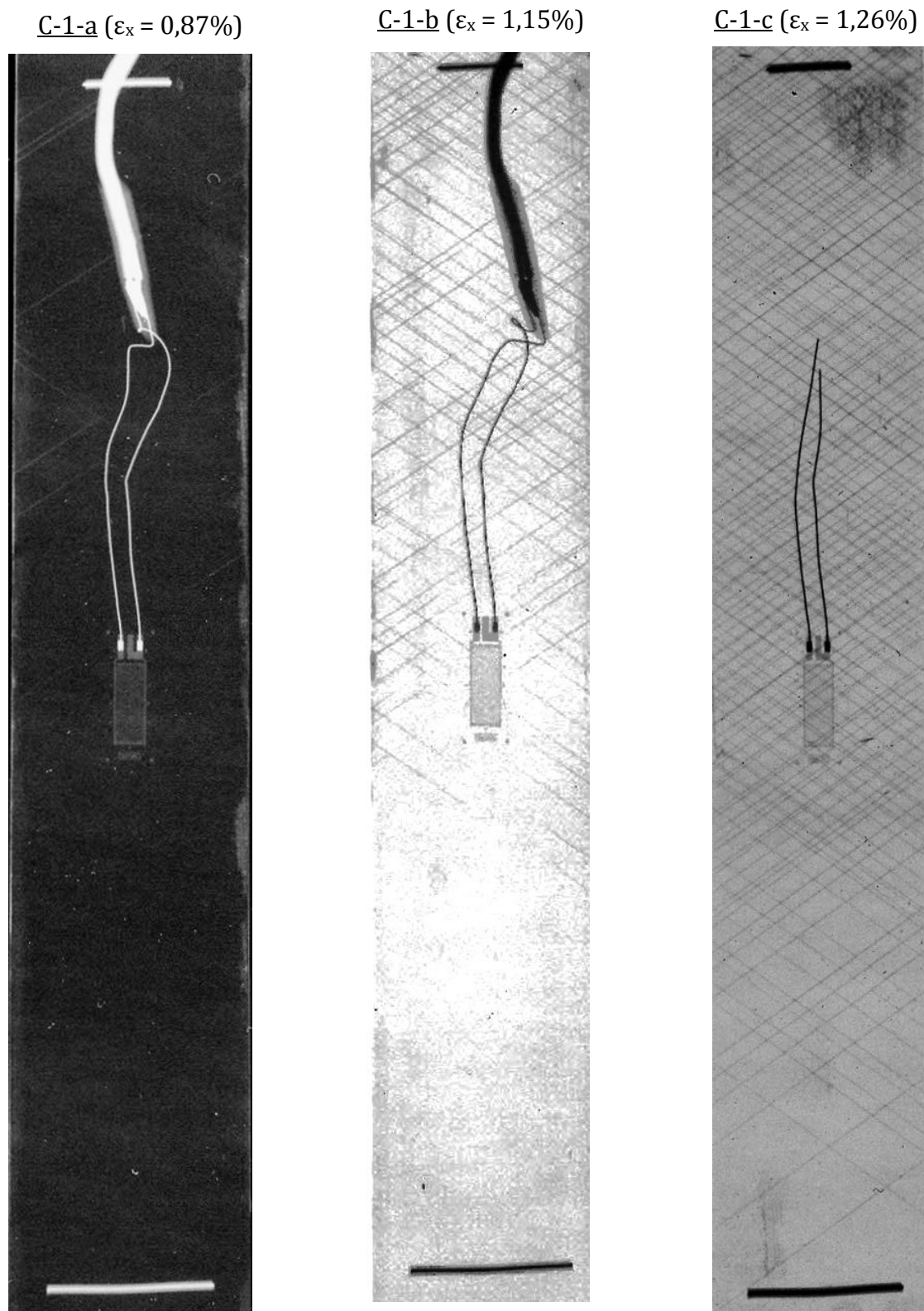
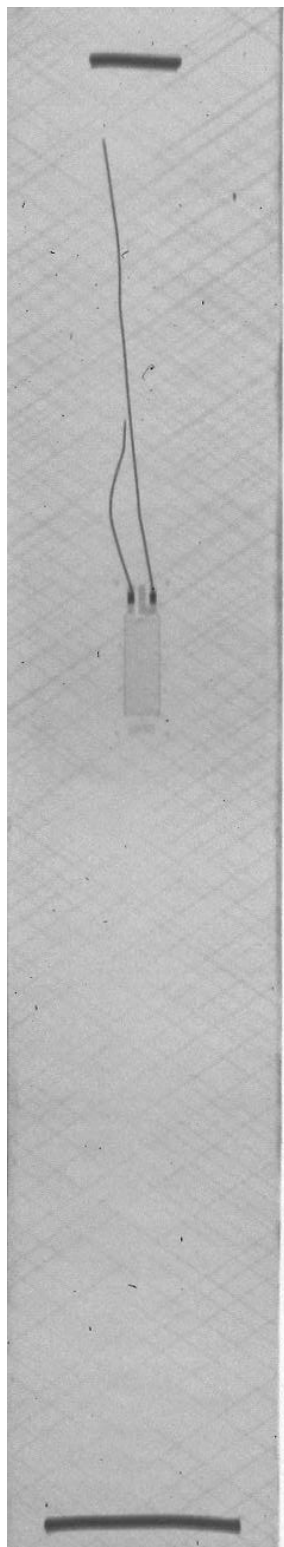


Figura Anexo.5. Radiografías realizadas tras cada etapa durante el ensayo C-1

Ensayo C-2 ($\epsilon_x = 1,40\%$)



Ensayo C-3 ($\epsilon_x = 1,43\%$)

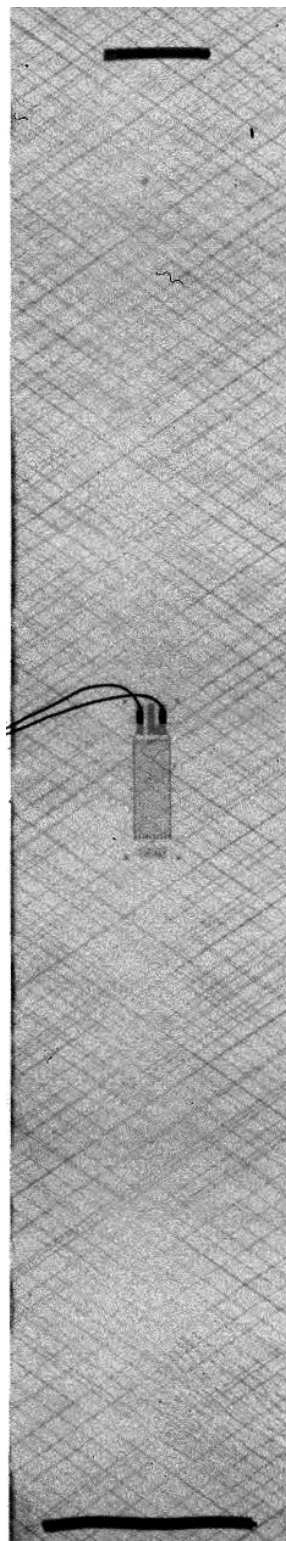
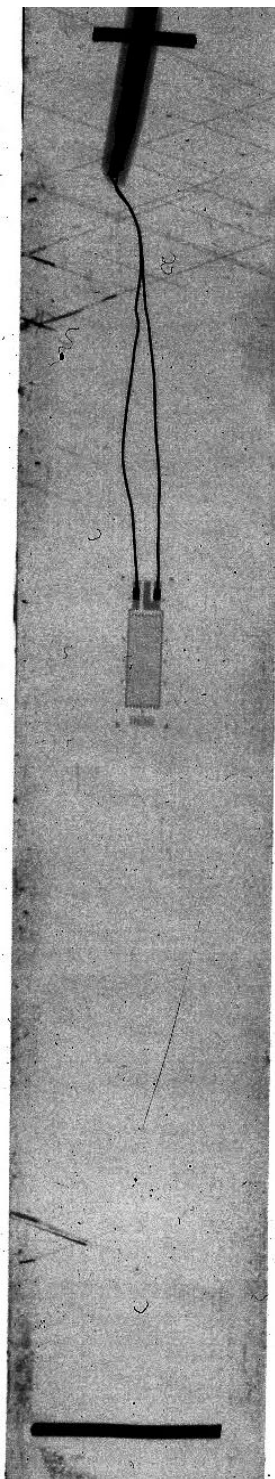


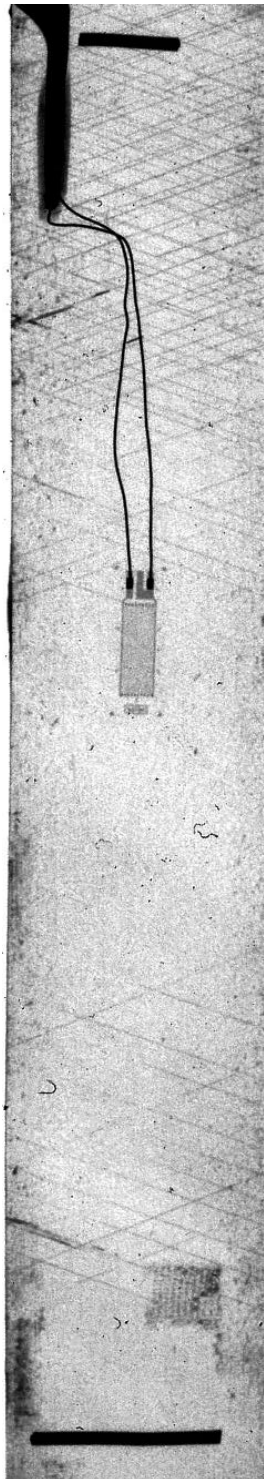
Figura Anexo.6. Radiografías realizadas tras los ensayos C-2 (izquierda) y C-3 (derecha)

Laminado D

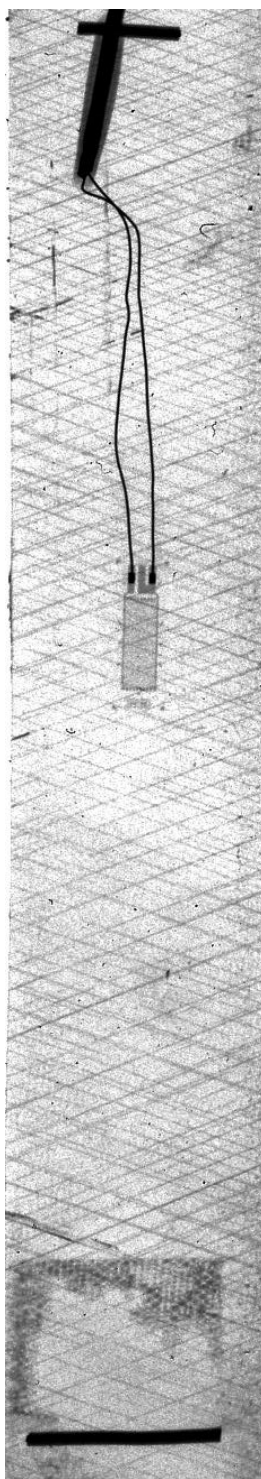
D-1-a ($\epsilon_x = 0,57\%$)



D-1-b ($\epsilon_x = 0,60\%$)



D-1-c ($\epsilon_x = 0,70\%$)



D-1-d ($\epsilon_x = 1,20\%$)

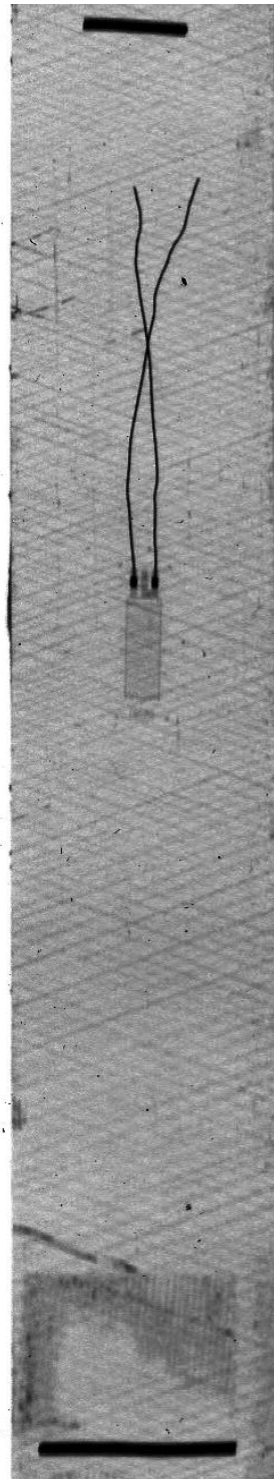
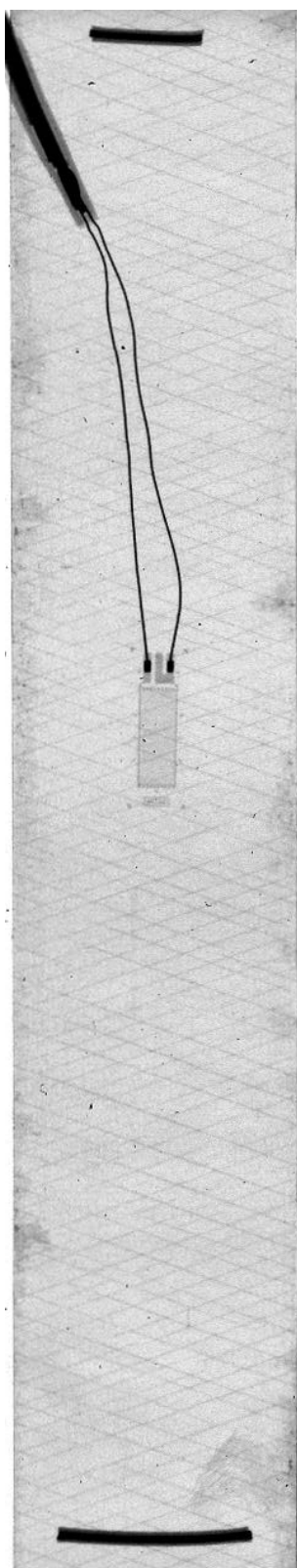
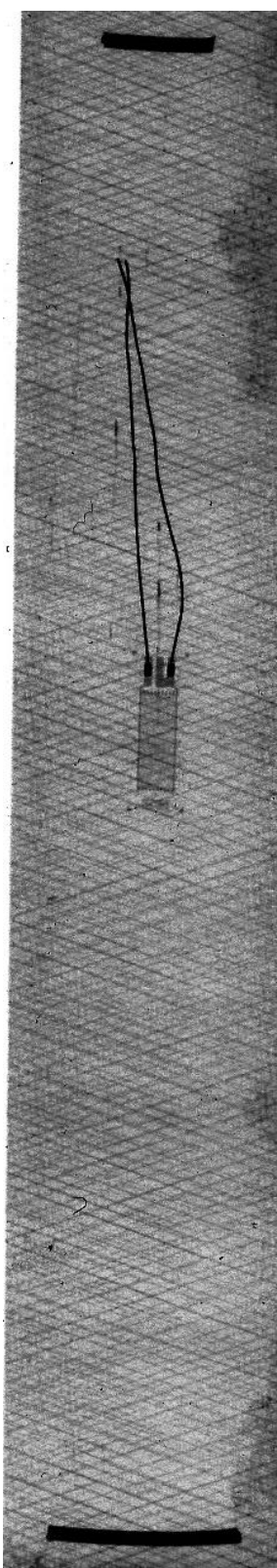


Figura Anexo.7. Radiografías realizadas tras cada etapa durante el ensayo D-1

D-2-a ($\epsilon_x = 0,75\%$)



D-2-b ($\epsilon_x = 1,25\%$)



D-3 ($\epsilon_x = 1,20\%$)

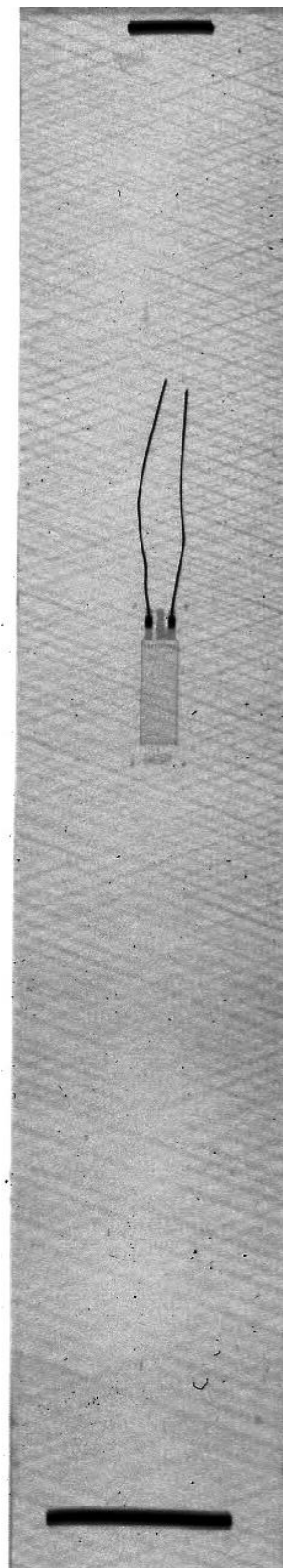


Figura Anexo.8 Radiografías realizadas en los ensayos D-2 (izquierda y centro) y D-3 (derecha)

Referencias

- [1] Advanced Composites Group. www.advanced-composites.co.uk
- [2] Advanced Composites Group. *Introduction to Advanced Composites and Prepreg Technology*.
- [3] Advanced Composites Group MTM45-1/IM7-145 32%RW. *Material property data report*. National Center for Advanced Material Performance (NCAMP), Abril 2011
- [4] ASTM International. ASTM D3039/D3039M-08. www.astm.org
- [5] Barbero Ever J. *Introduction to Composite Materials Design*. Second edition. CRC Press. ISBN 978-1-4200-7915-9
- [6] Barbero, Ever J., Cortés, Daniel H. *A mechanistic model for transverse damage initiation, evolution, and stiffness reduction in laminated composites*.
- [7] Barbero, E.J., Sgambitterra, G., Adumitroaie, A., Tessler, A. *A robust three-node shell element for laminated composites with matrix damage*.
- [8] Barbero, E.J., Sgambitterra G., Adumitroaie, A., Martínez, X. *A discrete constitutive model for transverse and shear damage of symmetric laminates with arbitrary stacking sequence*.
- [9] Bryan Michael Louis (thesis). *Gas transport in out-of-autoclave prepreg laminates*.
- [10] Cortés, Daniel H., Barbero, Ever J. *Stiffness reduction and fracture evolution of oblique matrix cracks in composite laminates*.
- [11] Crossman, F.W and Wang, A.S.D. *The Dependence of Transverse Cracking and Delamination on Ply Thickness in Graphite/Epoxy laminates*.
- [12] De-Comp Composites, INC. www.decomp.com.
- [13] De Rosa, Igor M, Santulli, Carlo, Sarasini, Fabrizio. *Acoustic emission for monitoring the mechanical behavior of natural fibre composites: A literature review*.
- [14] E976. *Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response*.
- [15] E750. *Standard Practice for Characterizing Acoustic Emission Instrumentation*.
- [16] Groves, S.E, Harris, C.E, Highsmith, A.L, Allen, D.H and Norvell, R.G. *An Experimental and analytical Treatment of Matrix Cracking in Cross-Ply Laminates*.
- [17] Material Safety Data Sheet material MTM45-1. MSDS.444-E100-PT3 Clear Waterborne Epoxy-Part B
- [18] Material Safety Data Sheet M-Bond 200 Adhesive
- [19] Material Safety Data Sheet M-Prep Conditioner A
- [20] Material Safety Data Sheet M-Prep Neutralizer 5A
- [21] Material Safety Data Sheet Zinc Iodide MSDS
- [22] Micro-Measurements Vishay. www.vishaypg.com/micro-measurements.

-
- [23] Model 793.10 MultiPurpose TestWare. Manual máquina universal de ensayos
 - [24] National Instruments. www.ni.com
 - [25] PCI-2 Based AE System User's Manual. Manual del usuario del sistema de Emisiones Acústicas
 - [26] Pooria Sharif Kashani (thesis). *An ex-situ material state monitoring of curing based on viscoelastic properties in polymer composites.*
 - [27] Prosser, W. H, Johnson, W. S. *Monitoring Damage Growth in Titanium Matrix Composites using Acoustic Emission.*
 - [28] Qi, Gang, Barhost, Alan, Hashemi, Javad & Kamala, Girish. *Discrete Wavelet Decomposition of Acoustic Emission signals from carbon-fiber-reinforced composites.*
 - [29] Quispitupa, Amilcar, Shafiq, Basir, Frederick, Just, Serrano David. *Acoustic emission based tensile characteristics of sandwich composites.*
 - [30] Technical manual Faxitron Cabinet X-ray Systems Model 43855A
 - [31] Varna, J, Joffe, N.V, Akshantala, R, Talreja, R. *Damage in composite laminates with off-axis plies.*
 - [32] Varna, Janis, Joffe, Roberts, Tarleja, Ramesh. *A synergistic damage-mechanics analysis of transverse cracking in $[\pm 0/90_4]$ laminates.*
 - [33] Yokozeiki, Tomohiro, Aoki, Takahira, Ogasawara, Toshio, Ishiwaka, Takashi. *Effects of layup angle and ply thickness on matrix crack interaction in contiguous plies of composite laminates.*
 - [34] Yokozeiki, Tomohiro, Aoki, Takahira, Ishiwaka, Takashi. *Consecutive matrix cracking in contiguous plies of composite laminates.*
 - [35] http://www.aceengineerings.com/public_html/tech_frp.html
 - [36] <http://www.triumphgroup.com/companies/triumph-aerospace-systems-wichita/capabilities/composite-manufacturing>
 - [37] <http://www.directindustry.es/prod/epotech/tejidos-de-carbono-equilibrados-54842-359244.html>
 - [38] http://airtech.lu/site/es_index.php
 - [39] <http://juandelacuerva.blogspot.com/2008/06/materiales-compuestos.html>